

Rediseño y mejora del sistema de comunicaciones de vídeo para control de un dron de carreras casero



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: Angel Albéniz Marquínez

Director: Jorge Teniente Vallinas

Pamplona, 19 de junio de 2018

Agradecimientos

Lo primero quisiera agradecer a mis padres a mi hermano y a toda mi familia por el apoyo que me han ofrecido en estos 4 años de carrera, sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

También me gustaría agradecer a mis amigos y compañeros con los cuales he compartido tantos buenos momentos.

Por ultimo me gustaría agradecer a Dr. Jorge Teniente por apoyarme en todo momento con esta idea de proyecto y ayudarme con todo lo que fuera necesario, sin su ayuda esto no hubiera sido posible.

Gracias a todos.

Resumen

Este trabajo propone el rediseño y la mejora de un radio enlace de comunicaciones para un dron de carreras. Este radio enlace es el encargado de transmitir a tiempo real y con la mínima latencia posible la señal de vídeo capturada por un dron al controlador en tierra durante el vuelo. El enlace es analógico, modula la señal de vídeo en FM, trabaja en la banda de 5.8 GHz y utiliza antenas omnidireccionales de polarización circular, pero sufre de problemas de interferencia con el resto de sistemas a bordo y con otros drones cercanos que hacen que el vídeo recibido pierda calidad y sufra cortes de comunicación que impiden el manejo correcto de la aeronave.

Para realizar esta mejora se pretende primero llevar a cabo un estudio de la adaptación de las antenas actualmente utilizadas y de los dieléctricos que las recubren para así poder modificarlas y adaptarlas correctamente al sistema. En segundo lugar, se pretende estudiar la posibilidad de diseñar otros modelos de antenas para sustituirlas con el fin de mejorar la comunicación, la aerodinámica y sobre todo que su ubicación y fabricación sea lo suficientemente robusta como para aguantar los impactos que suele sufrir esta aeronave sin destruirse. Por último se pretende diseñar y construir un receptor con diversidad de antenas para dicho enlace.

Abstract

This project proposes the redesign and improvement of a radio communication link for a racing drone. This radio link is responsible for transmitting in real time and with the minimum possible latency the video signal captured by a drone to the pilot on the ground during the flight. The link is analogue, modulates the video signal in FM, works in the 5.8 GHz band and uses circular polarization omnidirectional antennas, but suffers from interference problems with the rest of the systems on board and with other nearby drones that make the received video lose quality and suffer communication cuts that prevent the correct handling of the aircraft.

To carry out this improvement, it is first intended to perform a study of the adaptation of the antennas currently used and the dielectrics that cover them in order to modify and adapt them correctly to the system. Secondly, it is intended to study the possibility of designing other models of antennas to replace them in order to improve communication; aerodynamics and stiffness to withstand the impacts that this aircraft usually experiences without destroying itself. Finally, it is intended to design and build a receiver with antenna diversity for said radio link.

KeyWords

Dron, Antena, 5.8GHz, Diversity, Pagoda, TPU, HFSS, FPV

Contenido

1- Introducción	8
2- Diseño de nuevas antenas	9
2.1- Estado del arte	9
2.2- Estudio de las antenas actuales:	10
2.2.1- Medidas.....	10
2.2.2- Conclusiones	17
2.3- Diseño de la antena.....	18
2.3.1- Consideraciones para el diseño	18
2.3.2.1- Introducción	18
2.3.2.2- Características “Pagoda Antenna”	18
2.3.2- Caracterización del TPU	20
2.3.3- Diseño en ANSYS HFSS	24
2.3.3.1- Replicado de la antena original.....	24
2.3.3.2- Efecto disco inferior	25
2.3.3.3- Diseño protector de TPU.....	27
2.3.3.4- Implementación del protector de TPU en el diseño HFSS	28
2.3.3.5- Adaptación de la antena al protector de TPU	28
2.4- Resultados finales del diseño en HFSS.....	31
2.5- Construcción de la antena	33
2.5.1- Generación de archivos Gerber	33
2.5.2- Diseño del útil de construcción.....	35
2.5.3- Fabricación de los protectores de TPU	36
2.5.4- Proceso de montaje	37
2.6- Testeo de la antena.....	39
2.7- Conclusiones y mejoras.....	42
3- Diseño de receptor con diversidad de antenas	44
3.1- Objetivo:.....	44
3.2- Diseño del receptor:.....	44
3.2.1- Componentes	45
3.2.2- Firmware	50
3.2.3- Esquemático.....	50
3.3- Fabricación	52
3.4- Producto final.....	55
3.5- Conclusiones y mejoras.....	56

4- Conclusiones	57
5-Lineas futuras.....	58
6- Bibliografía	59

1- Introducción

El objetivo principal de este trabajo fin de estudios es el de mejorar el sistema inalámbrico de transmisión de video analógico aire-tierra de un dron.

Este objetivo se tratara de llevar acabo de dos maneras diferentes, primero con el diseño de unas nuevas antenas que mejoren a las ya existentes y segundo con el diseño de un nuevo receptor con diversidad de antenas que nos aporte considerables ventajas respecto a receptores convencionales.

Para el diseño de las nuevas antenas primero se llevara a cabo un exhaustivo estudio de diferentes tipos y modelos de antenas existentes. Con este estudio se tratara de sacar conclusiones y buscar defectos para resolver y mejorar el funcionamiento de las mismas.

Tras este estudio se comenzara el proceso de diseño de la nueva antena, la cual tratara de solventar los defectos encontrados en las antenas actuales. Este proceso de diseño y optimización de la antena se realizara utilizando el software ANSYS HFSS (High Frequency Structure Simulator).

Una vez se consiga una solución para el diseño de la antena la cual cumpla los requisitos necesarios, se pasara al proceso de construcción de la misma.

Por último y una vez construida la antena se pasara al proceso de certificación de la misma, en el cual se le realizaran todas las correspondientes medidas para garantizar su correcto funcionamiento.

En cuanto al diseño y fabricación de un nuevo receptor con diversidad de antenas. Primero se expondrán las ventajas que dicho tipo de receptor tiene sobre un receptor convencional. Después se comenzara el proceso de diseño, en el cual se fijaran unos requerimientos necesarios. Tras esto se comenzara el proceso de selección de los diferentes componentes electrónicos que este integra. Por último se ensamblara el receptor y se testeara su correcto funcionamiento.

Llegados a este punto se realizara una visión global del sistema total, compuesto por las nuevas antenas y el receptor con diversidad. Y se compara este sistema con los existentes anteriormente mostrando las ventajas que este otorga.

2- Diseño de nuevas antenas

2.1- Estado del arte

Las antenas para la transmisión y recepción de video analógico en sistemas tierra-aire son una solución muy concreta para un propósito muy particular englobado en el ámbito de los drones.

Dichas antenas deben estar diseñadas para funcionar a frecuencia de 5.8GHz concretamente en la banda de (5645MHz - 5945MHz) donde se encuentran repartidos los diferentes canales de difusión de video analógico recogidos en los diferentes estándares.

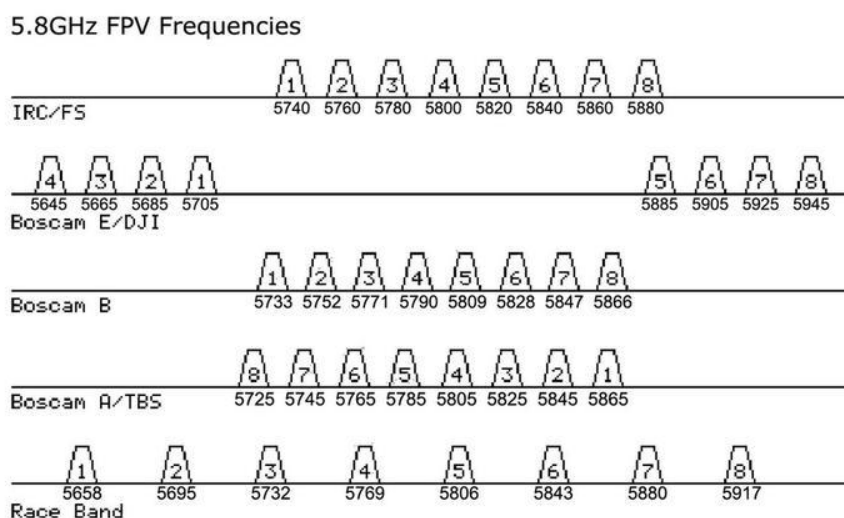


Figura 1: Canales de difusión video analógico en la banda de 5.8GHz.

Generalmente se utiliza polarización circular en estas antenas, debido a la robustez que esta presenta frente a las reflexiones multipath de primer orden. Ya que cuando una onda con polarización circular incide sobre una superficie, la componente reflejada de la misma lo hace con dirección de polarización opuesta a la incidente. Este fenómeno es de gran ayuda en recepción donde todas las reflexiones multipath de primer orden se ven considerablemente atenuadas debido a la opuesta dirección de polarización de la antena receptora.

Su diagrama de radiación debe de ser lo más isotrópico posible. Esto se debe a que se desea un comportamiento uniforme de la misma independiente de la orientación y posición de la aeronave frente a la estación terrena. Y así abarcar todas las posibles orientaciones y posiciones diferentes que la aeronave puede tomar.

Además dichas antenas deben de cumplir requisitos de robustez física y aerodinámica. Ya que deben de soportar la carga aerodinámica y fuerzas G a las que estarán sometidas en vuelo. De igual manera deben ser capaces de soportar los posibles impactos recibidos en aterrizajes y colisiones.

2.2- Estudio de las antenas actuales:

En este estudio se van a realizar medidas de diferentes tipos y modelos de antenas disponibles en el mercado actualmente, diseñadas para este mismo propósito. Una vez tomadas dichas medidas se tratará sacar conclusiones para identificar problemas comunes y formas de solventarlos.

Este estudio se centrará únicamente en la medida de parámetro S_{11} . Esto se debe a que este parámetro es el que mayor efecto tiene en el funcionamiento global de la antena.

El diagrama de radiación no es tan importante en este caso particular ya que se quiere conseguir una radiación lo más isotrópica posible, por tanto las diferencias que se apreciaran entre medidas no serán tan significativas ni tampoco supondrán grandes cambios en el funcionamiento global de la antena aunque la discriminación entre polarizaciones circulares siempre es un parámetro que en un segundo orden de importancia respecto al S_{11} debiera de conocerse y optimizarse, pero debido a las dificultades para ser medido correctamente se ha obviado en este caso.

Las medidas del S_{11} se han realizado con un analizador vectorial de redes, más concretamente con el modelo HP 8753D de la marca Hewlett Packard aunque inicialmente y para validar las medidas se usó un analizador de redes de más alta gama, concretamente un E8361C de Agilent Technologies.

Para realizar las medidas primero se calibra el analizador vectorial de redes con su correspondiente kit de calibración. Posteriormente se realizan las medidas de todas las antenas.

2.2.1- Medidas

Las medidas se realizan en un span de frecuencias desde 5GHz con frecuencia mínima a 6GHz de frecuencia máxima.

Además en las gráficas de medida también se muestran por medio de unos marcadores las frecuencias centrales de los 8 canales de la banda de trabajo de los sistemas de transmisión y recepción de video analógico que se utilizan, dichos marcadores se extienden desde 5658MHz hasta 5917MHz.

Estos marcadores serán de gran ayuda a la hora de visualizar en comportamiento de las antenas estudiadas en los diferentes canales de transmisión de video.

A continuación se muestran las medidas para un total de 16 antenas diferentes:

1- SpiroNet (Gris):

Antena de hilo tipo "cloverleaf" con carcasa de plástico.

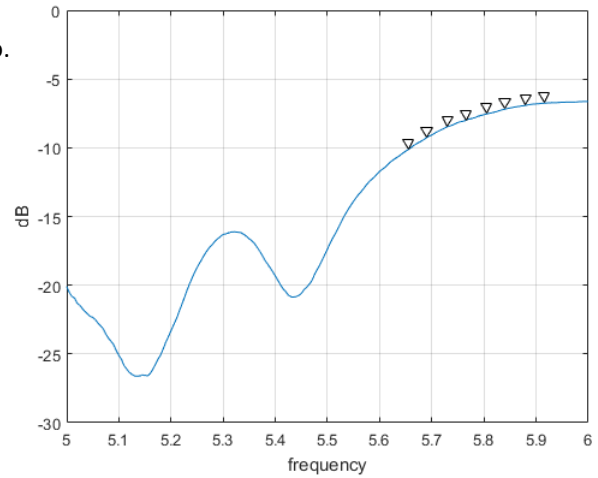


Figura 2

2- SpiroNet (Negra):

Antena de hilo tipo "cloverleaf" con carcasa de plástico.

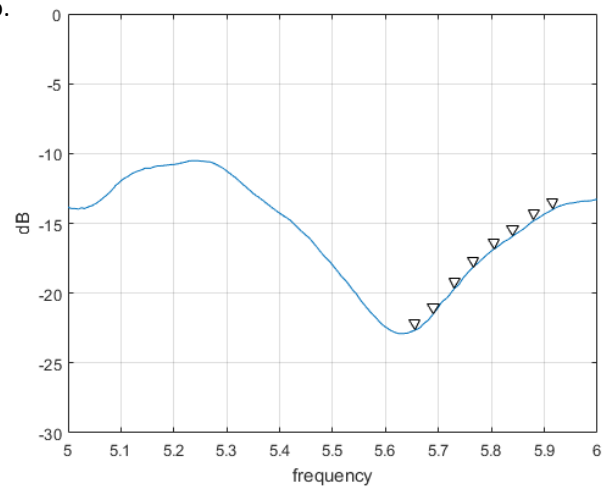


Figura 3

3- SpiroNet (Cable fino):

Antena de hilo tipo "cloverleaf" con carcasa de plástico.

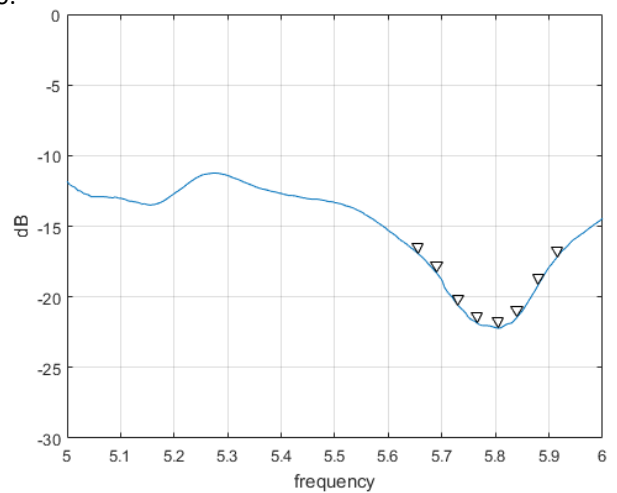


Figura 4

4- SpiroNet (Sin tapa):

Antena de hilo tipo "cloverleaf" sin carcasa de plástico.

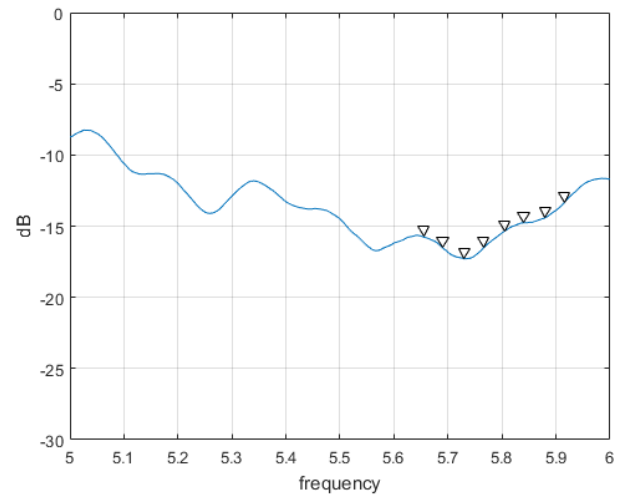


Figura 5: SpiroNet (Sin tapa).

5- Foxeer:

Antena de hilo tipo "cloverleaf" con carcasa de plástico.

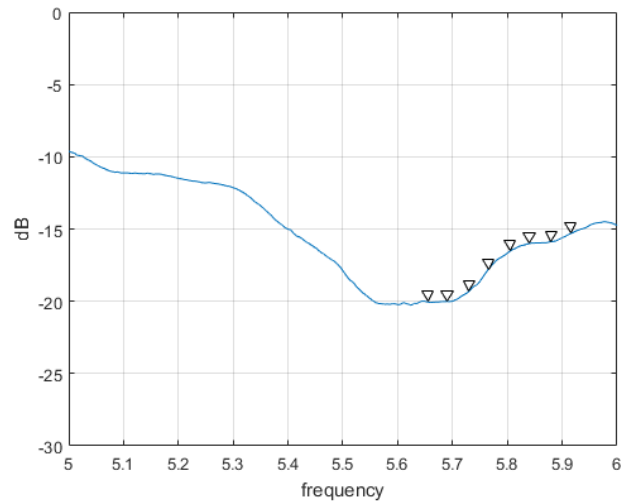


Figura 6: Foxeer.

6- Cloverleaf (Genérica):

Antena de hilo tipo "cloverleaf" sin protección.

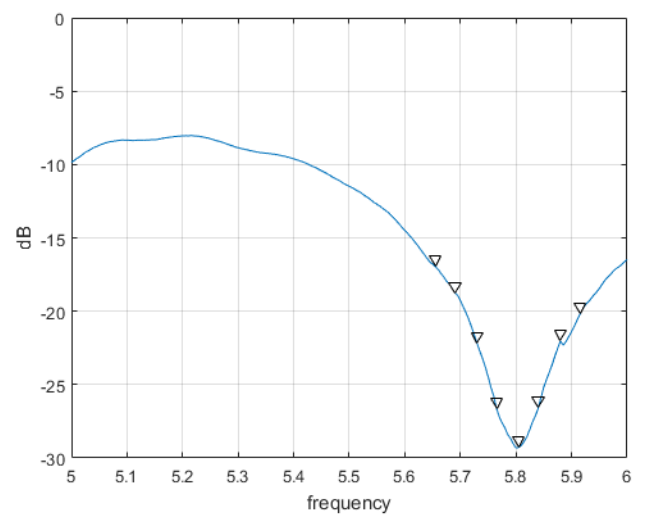


Figura 7: Cloverleaf (Genérica).

7- Pagoda (KDR):

Antena "microstrip" con recubrimiento de epoxi.

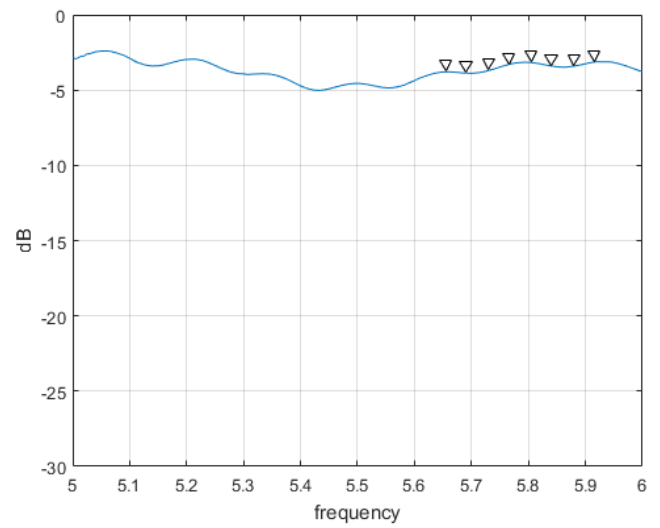


Figura 8: Pagoda (KDR).

8- Pagoda (GepRC):

Antena "microstrip" con recubrimiento de goma.

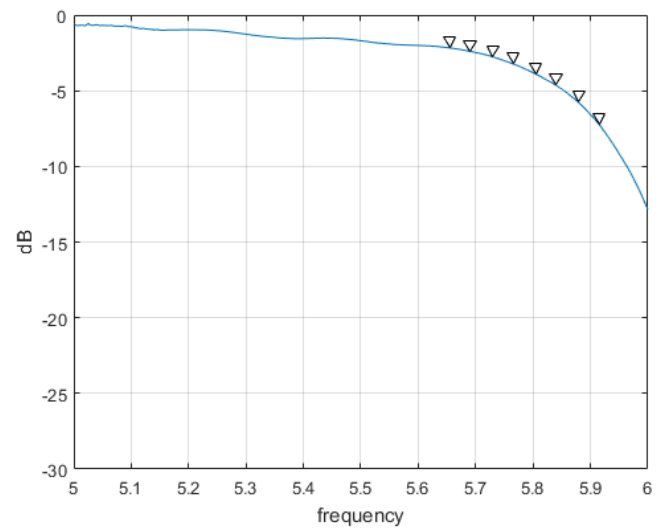


Figura 9: Pagoda (GepRC).

9- Pagoda (DDC):

Antena "microstrip" con recubrimiento impreso en 3d con filamento de TPU.

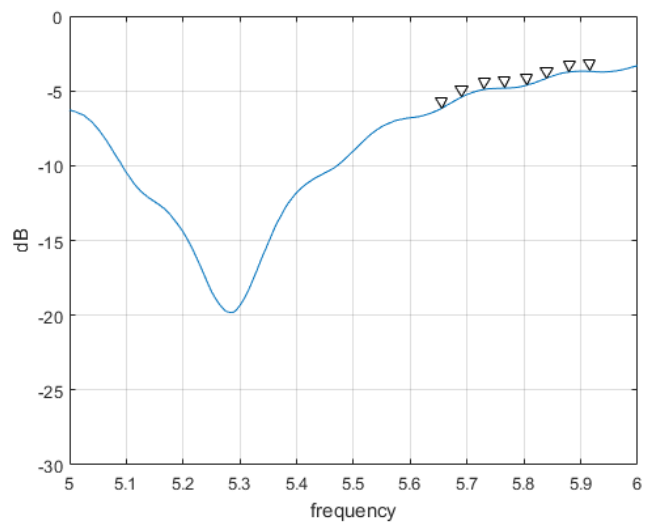


Figura 10: Pagoda (DDC).

10- Pagoda (DDC) sin protector:

Antena "microstrip" sin protección.

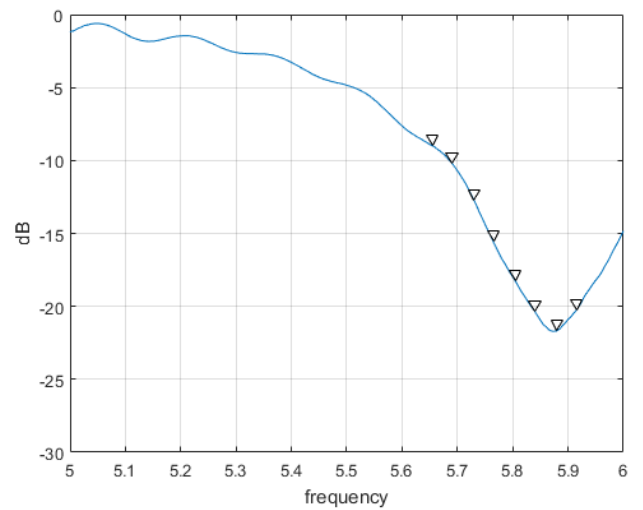


Figura 11: Pagoda (DDC) sin protector.

11- Triumph (Imitación):

Antena de hilo (array de dipolos) con carcasa de plástico.

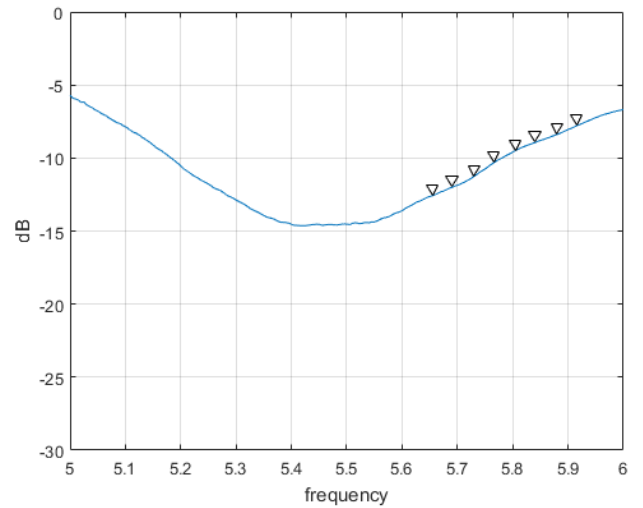


Figura 12: Triumph (Imitación).

12- Triumph (Original):

Antena de hilo (array de dipolos) con carcasa de plástico.

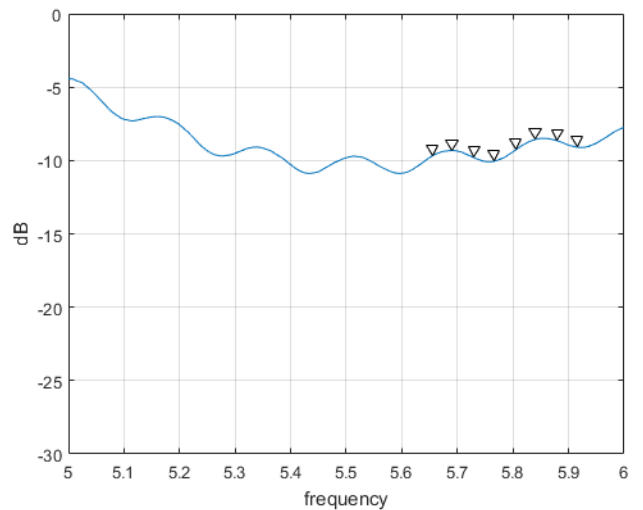


Figura 13: Triumph (Original).

13- Six leaf:

Antena de hilo tipo "cloverleaf" de 6 lóbulos.

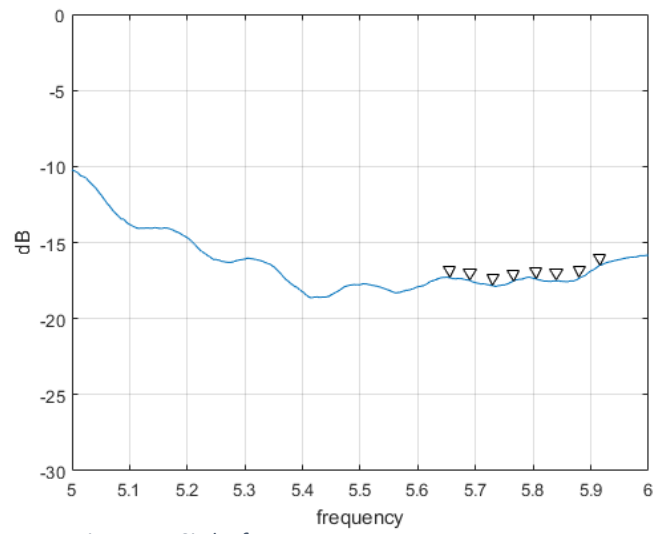


Figura 14: Six leaf.

14- Six leaf (Con epoxi):

Antena de hilo tipo "cloverleaf" de 6 lóbulos recubierta de epoxi.

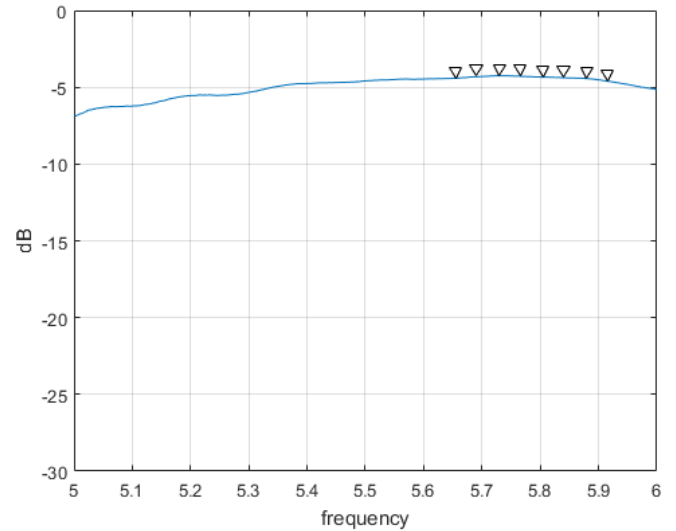


Figura 15: Six leaf (Con epoxi).

15- Aomaway:

Antena de hilo tipo "cloverleaf" sin protección.

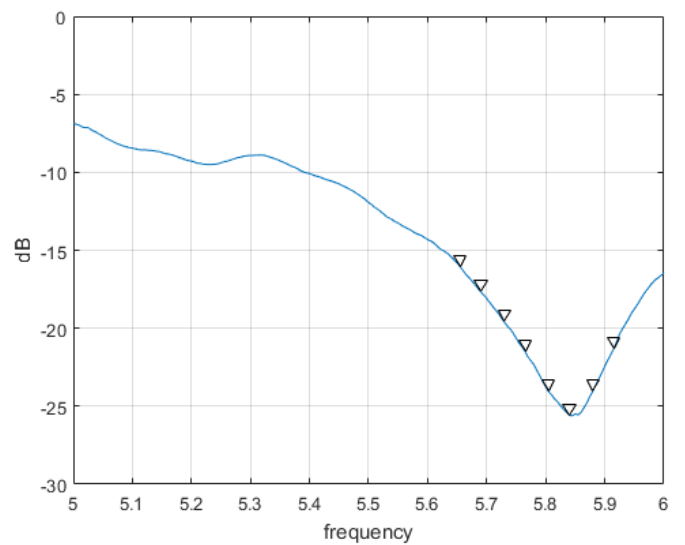


Figura 15: Aomaway.

16- Aomaway (Termofusible):

Antena de hilo tipo "cloverleaf" con termofusible.

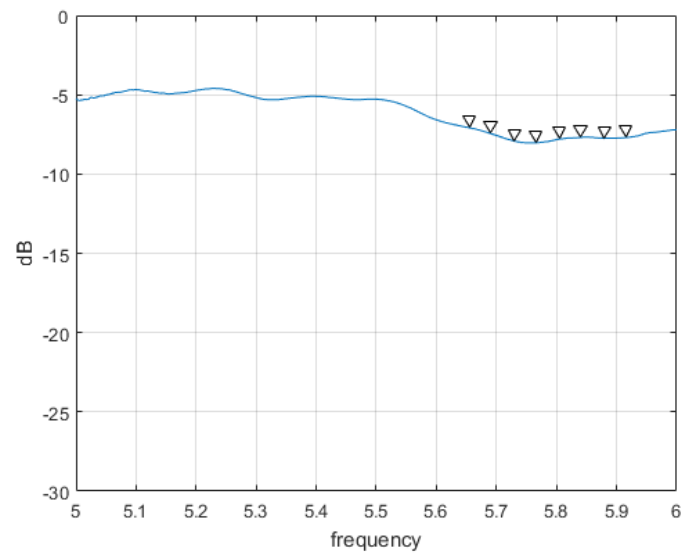


Figura 16: Aomaway (Termofusible).

2.2.2- Conclusiones

Tras observar los resultados obtenidos se llegan a obtener múltiples conclusiones al respecto.

Lo primero que se aprecia es que con carácter general las antenas estudiadas tienen un comportamiento peor del esperado. Esto es muy notable en antenas como la 1 y la 12, las cuales provienen de fabricantes reputados en el ámbito de los drones, se publicitan como modelos “Flagship” asegurando un excelente comportamiento y además tienen un precio superior a la media debido a ello. En estas antenas concretamente sorprende ver su mala adaptación.

También se observa que el ancho de banda de las antenas es pequeño respecto a la banda que tienen que cubrir, esto hace que cualquier pequeño desplazamiento en la frecuencia central de adaptación de la antena cause importantes empeoramientos en la adaptación de los canales de la banda de trabajo. Esto se aprecia muy claramente en las antenas 8 y 9.

Por último la conclusión más importante que se ha obtenido de los resultados tiene que ver con las protecciones utilizadas en las antenas. Dichas protecciones tiene una gran importancia en este tipo de antenas ya que la durabilidad de las mismas es una de sus características más importantes y se da el caso que todas las antenas con protección presentan peor resultado de adaptación

Se llega a la conclusión de que las antenas han sido diseñadas para funcionar sin ningún tipo de protección. Y cuando el fabricante o el usuario final añade la protección, lo hace sin tener en cuenta los efectos que estas pueden causar.

Este efecto se aprecia muy claramente cuando se pasa de la antena número 15, a la número 16 a la cual el usuario final añade una protección de adhesivo termoplástico, empeorando drásticamente el comportamiento de la misma. Sin embargo este tipo de protecciones es muy necesario ya que el uso que se le da a estas antenas es muy agresivo y su durabilidad ha de estar garantizada.

Otro caso donde se aprecia este efecto es entre las antenas número 7, 8, 9 y 10. Todas estas antenas son exactamente el mismo modelo. La antena número 7 tiene a modo de protección un baño en resina epoxi aplicado por el usuario final. La antena numero 8 tiene a modo de protección un polímero termo retráctil colocado por el fabricante de la misma. La antena numero 9 tiene a modo de protección un casquillo de poliuretano termoplástico (TPU) colocado también por el fabricante. Y por último la antena numero 10 carece de protección alguna. Cabe aclarar que la antena número 9 y la numero 10 son físicamente la misma antena con y sin la protección de poliuretano termoplástico (TPU).

Con las medidas de estas cuatro antenas se puede apreciar claramente que la antena está diseñada para funcionar sin ningún tipo de protección y en los otros tres casos en los cuales se le han añadido diferentes tipos de protección se empeora en gran medida su funcionamiento.

Y por último, otro caso en el que también se aprecia este efecto es cuando se pasa de la antena numero 13 a la numero 14 la cual es idéntica a la numero 13 pero con un baño de resina epoxi. En este caso también se comprueba que dicha protección empeora drásticamente el comportamiento de la antena.

2.3- Diseño de la antena

En este punto se tratara de diseñar una nueva antena la cual solvente los problemas encontrados en el estudio de las antenas actuales incluyendo una protección de plástico TPU en el diseño para que su durabilidad se vea incrementada de manera notable.

2.3.1- Consideraciones para el diseño

2.3.2.1- Introducción

Para el diseño de una nueva antena se opta por utilizar un diseño ya existente y mejorarlo solventado los problemas encontrados en él. Esto supone una gran ventaja respecto a diseñar una antena desde cero, ya que las soluciones existentes para este tipo de antena ya están muy bien optimizadas y hallar una solución completamente nueva en la cual se mejore a las soluciones actuales sería una tarea muy complicada y que puede salir fuera de un TFG de 4 meses de duración.

La antena de la cual partiremos es la llamada “Pagoda Antenna” diseñada por Maarten Baert y de la cual se disponen de unos planos bastante detallados.

2.3.2.2- Características “Pagoda Antenna”

La antena Pagoda es una antena omnidireccional con polarización circular basada en tecnología microstrip. Los principales objetivos que Maarten Baert propuso para su diseño fueron:

- Diagrama de radiación omnidireccional.
- Buena relación axial lo que significa alta discriminación entre polarizaciones circulares.
- Minimizar el tamaño.
- Barata y fácil de construir.

La antena está formada por dos discos concéntricos de FR4 con unas pistas con una determinada geometría. Estos dos discos se pueden mandar fabricar a cualquier fabricante de PCBs consiguiendo unas tolerancias muy buenas. Una vez obtenidos los discos basta con soldarlos a un cable coaxial con la ayuda de un útil de fabricación. Este proceso hace que la fabricación de la antena sea muy sencilla y el coste total de la misma muy bajo.

Además, las finas y consistentes tolerancias que se pueden alcanzar en la geometría de las PCBs hacen que esta se comporte muy bien en cuanto a diagrama de radiación, relación axial y adaptación.

El único problema que tiene esta antena, al igual que otras muchas, es que resulta muy frágil ante pequeños golpes y colisiones. Esto hace que sea obligatorio añadirle algún tipo de protección.

Como ya se ha comentado en el apartado 2.2.2 estas protecciones añadidas por fabricantes o por los usuarios finales empeoran drásticamente el comportamiento de la antena.

El objetivo principal de nuestro diseño será el de modificar la geometría de la solución conseguida por Maarten Baert, para así adaptar su funcionamiento cuando esta integre una protección de poliuretano termoplástico (TPU) fabricado por medio de una impresora 3D FDM.

Además se desea mejorar o por lo menos mantener el buen funcionamiento de la antena original en los siguientes campos:

- Diagrama de radiación.
- Relación axial.
- Adaptación.
- Tamaño reducido.
- Coste y facilidad de construcción.

Se dará por inválida cualquier solución que al menos no mantenga el buen funcionamiento de la antena original en cualquiera de estos campos.

El procedimiento para el diseño será el siguiente:

En primer lugar se modelara la antena original en HFSS sin ningún tipo de protección a partir de los planos disponibles, para después realizarle modificaciones en sus dimensiones hasta que se consiga verificar un correcto funcionamiento el cual debe coincidir exactamente con las especificaciones técnicas de la misma.

Una vez completado el paso anterior utilizaremos esta antena como punto de partida sobre la cual comenzar el proceso de optimización.

El primero paso para comenzar las optimizaciones será caracterizar dieléctricamente el poliuretano termoplástico (TPU), que más tarde se utilizara para diseñar un protector que cubra la antena y cumpla los requisitos mínimos de protección.

Cuando se termine el diseño del protector, este se introducirá en HFSS y se comenzara el proceso de optimización de la antena con dicho protector.

Para realizar este proceso se parametrizaran todos los valores a modificar de tanto la antena como del protector, y se comenzarán una serie de simulaciones paramétricas hasta llegar a una solución válida.

La solución final debe de cumplir todos los requisitos mencionados anteriormente, manteniendo o mejorando el funcionamiento de la antena original en cada uno de los diferentes campos e incluyendo el protector de plástico TPU.

Una vez conseguida esta solución se dará por concluido el proceso de diseño.

2.3.2- Caracterización del TPU

El TPU o poliuretano termoplástico, es un polímero elastomérico lineal, y por ello, termoplástico.

Este poliuretano termoplástico se caracteriza por:

- Alta resistencia al desgaste y la abrasión.
- Alta resistencia a la tracción y al desgarro
- Muy buena capacidad de amortiguación.
- Muy buena flexibilidad a bajas temperaturas.
- Tiene una excelente recuperación elástica.

Por estas características son por las cuales se ha determinado que este material es el idóneo para el objetivo que debe de que cumplir. Ya que al ser flexible a bajas temperaturas, tener una muy buena capacidad de amortiguación y una excelente recuperación elástica, es perfecto a la hora de soportar grandes impactos y amortiguarlos elásticamente sin sufrir daño alguno. Además es muy resistente al desgaste, la abrasión, la tracción y el desgarro, lo cual lo hace en todos los aspectos un material muy resistente.

Por otra parte este material está disponible en rollos de filamento, además de en las convencionales pellets. Esto es una característica clave ya que permite su uso en fabricación por adición, convencionalmente conocida como impresión 3D FDM (Fused Deposition Modelling). Esto es muy importante ya que permitirá construir los protectores en cualquier impresora 3D doméstica, disminuyendo en gran medida el coste de fabricación. Además permitirá abrir la posibilidad de la completa fabricación domestica de la antena.

Una vez expuestas las características generales del TPU se dispone a caracterizarlo dieléctricamente. Esto se debe a que los fabricantes de dicho polímero no aportan estas características sobre el material, únicamente se dan las propiedades mecánicas, físicas y térmicas del mismo.

Más concretamente las variables que se quieren caracterizar son, la permeabilidad relativa y la tangente de pérdidas del material. Cuando se conozcan estas dos variables ya se tendrá completamente caracterizado el material y se podrá introducir en HFSS para las posteriores simulaciones.

En este caso se va a utilizar un método experimental con el fin de simplificar el proceso de caracterización.

Este método consiste en:

Primero se ha de buscar una guía de onda rectangular la cual tenga su modo fundamental en la frecuencia a la cual queremos caracterizar nuestro material, concretamente hemos elegido la guía de onda WR-112 cuya banda de funcionamiento va de 6.5 a 10 GHz pero que tiene la frecuencia de corte de su modo fundamental a 5.26 GHz con lo cual es válida para caracterizar las características dieléctricas del TPU en la banda de funcionamiento de la antena.

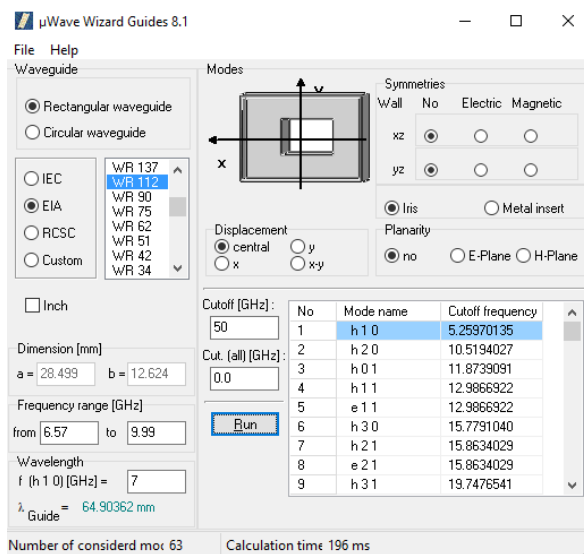


Figura 17: Guía de onda WR-112

Segundo se ha de rellenar una sección de la guía de onda con el material a caracterizar. Es muy importante que se conozcan las dimensiones y posición exacta de la zona rellenada. Además, el material debe de ser lo más puro y macizo posible si se quieren obtener resultados precisos.

La pieza rectangular de TPU que se introducirá dentro de la guía de onda tiene unas dimensiones de 28.99 mm de alto por 12.624 mm de ancho, mismas medidas internas que la guía de onda. Además se diseñará con 40 mm de longitud lo cual es suficiente para entrar en el centro del tramo liso de la guía de ondas WR-112 de que disponemos (10 cm) sin problema.

Dicha pieza se imprimió utilizando una impresora 3D modelo Whitbox de la marca Bq. Se configuró el parámetro infill de la impresión al 100 % de esta manera se consigue una pieza completamente maciza. Se introdujo la pieza de TPU maciza en la guía de ondas WR-112 asegurándonos de que queda lo más centrada posible.

En el analizador vectorial de redes se llevó a cabo una calibración completa de dos puertos “full two port” teniendo en cuenta las transiciones a SMA a WR-112 que se colocan en los extremos de la guía de onda. De esta manera se consiguen unos resultados mucho más precisos los cuales son significativamente más fáciles de replicar en HFSS. De otra manera, si la calibración se completa sin tener en cuenta los adaptadores a SMA de la guía de onda, los resultados tendrán pequeñas perturbaciones introducidas por dichos conversores, las cuales no son difíciles de equiparar en la simulación de HFSS.

Cuando se completó la calibración se comenzaron a tomar las medidas, utilizando un span de 2 GHz con frecuencia mínima y máxima de 5 y 7GHz respectivamente. Se tomaron y guardaron debidamente medidas de los parámetros S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{21} .

En HFSS se replica exactamente el mismo experimento usando las mismas medidas de guía de onda y pieza de TPU. Además se parametrizaron los valores de permeabilidad relativa y tangente de pérdidas. Una vez parametrizados dichos valores se comenzó un proceso de simulación en el cual se fueron haciendo barridos para diferentes valores de permeabilidad relativa y tangente de pérdidas. A la vista de estos resultados se fueron acotando los valores hasta llegar a unos valores los cuales se consideraron suficientemente precisos. En este caso se consideraron validos cuando se llegó a tres decimales de precisión en la tangente de pérdidas y dos decimales en la constante dieléctrica.

A continuación se muestran los resultados obtenidos por el analizador vectorial de redes y los resultados replicados en HFSS.

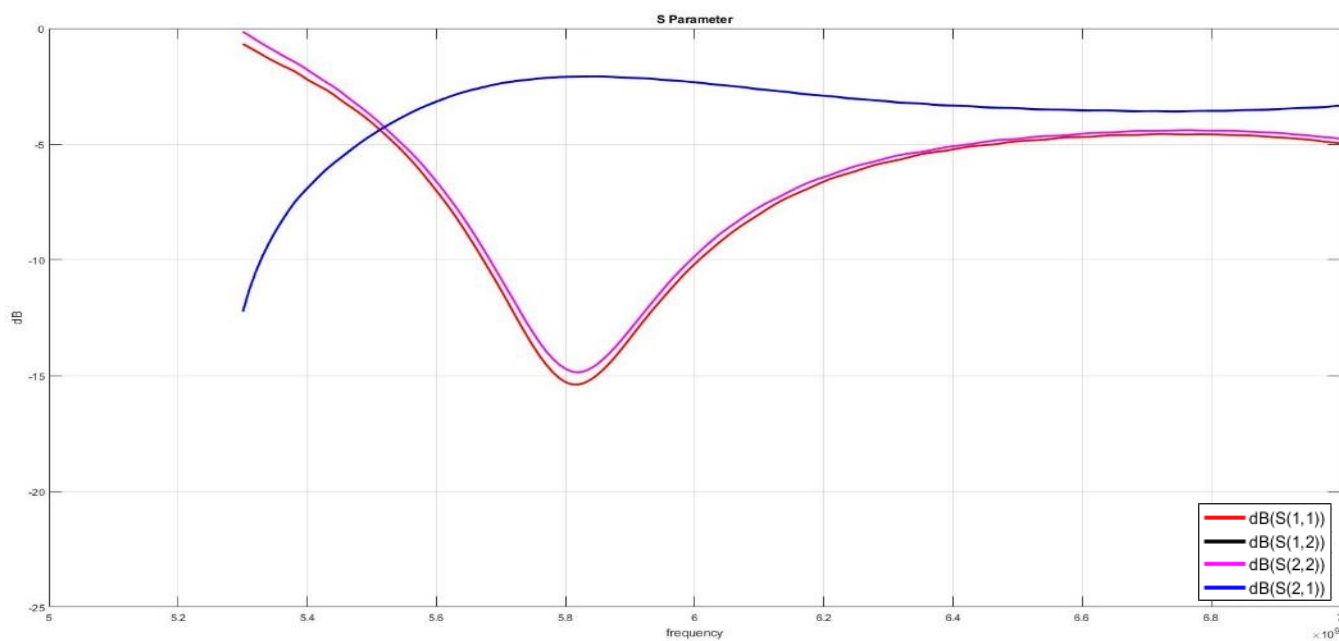


Figura 18: Medidas obtenidas con el analizador vectorial de redes de la guía de ondas WR-112 rellena de TPU (5.26 GHz es la frecuencia de corte del modo fundamental)

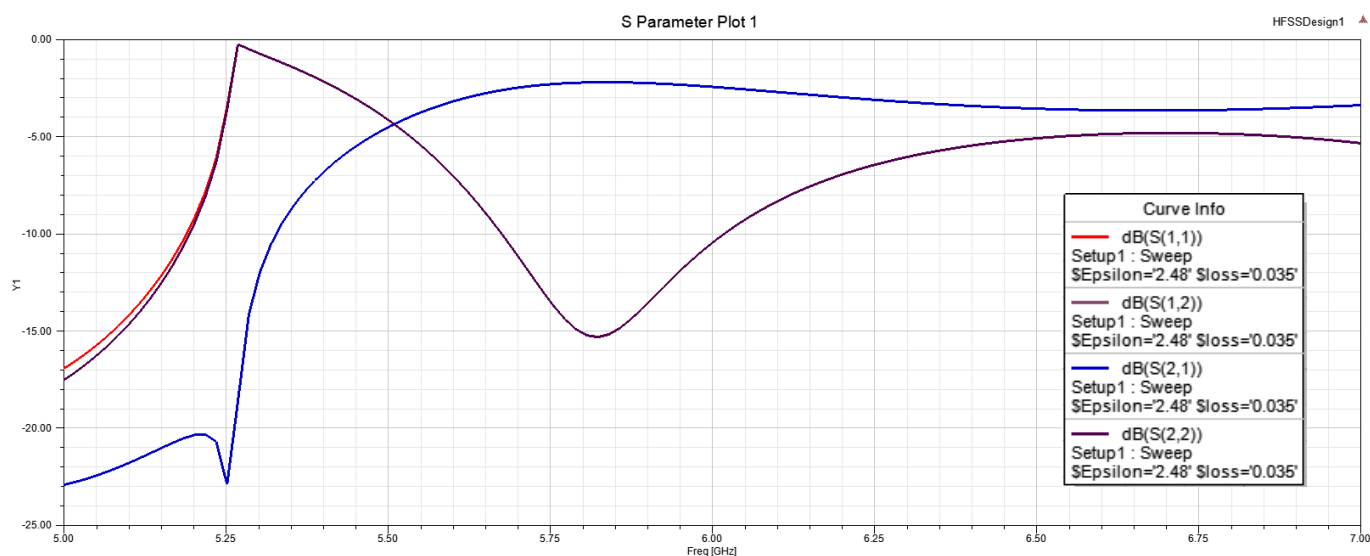


Figura 19: Medidas obtenidas en HFSS para la misma configuración (5.26 GHz es la frecuencia de corte del modo fundamental)

A la vista de los resultados obtenidos se confirma que el método de caracterización utilizado es eficaz y preciso a la hora de obtener resultados ya que ambas figuras de medida y simulación son idénticas. Los valores obtenidos para las variables que se querían caracterizar son:

- Permeabilidad relativa de 5.5 a 6 GHz: 2.48
- Tangente de pérdidas de 5.5 a 6 GHz: 0.035

Se consigue acotar hasta el segundo decimal de precisión en la parte real y hasta el tercer decimal en la tangente de pérdidas sin dificultad alguna.

Se sabía, debido a sus características, que el poliuretano termoplástico (TPU) era desde el punto de vista mecánico y físico, el material idóneo para este propósito. Pero se tenía una gran incertidumbre respecto a su comportamiento como dieléctrico.

Una vez conocidos los resultados de su caracterización dieléctrica se comprueba que el poliuretano termoplástico (TPU) es también un material dieléctricamente idóneo para este propósito, ya que su tangente de pérdidas es bastante pequeña lo cual no afectará en gran medida a la eficiencia total de la antena reduciendo sus pérdidas y a que la parte real es relativamente baja reduciendo las reflexiones que materiales más densos eléctricamente producirían en las ondas radiadas por la antena.

2.3.3- Diseño en ANSYS HFSS

En este apartado se va a abordar el diseño y optimización de la nueva antena en HFSS.

2.3.3.1- Replicado de la antena original

Como ya se ha comentado en el apartado 2.3.2.3 el primer paso para el diseño es replicar en HFSS la antena original sobre la cual se va a basar el nuevo diseño.

Esto se tiene que hacer tomando medidas sobre una antena física ya que no se dispone de ningún archivo digital de la misma suficientemente preciso.

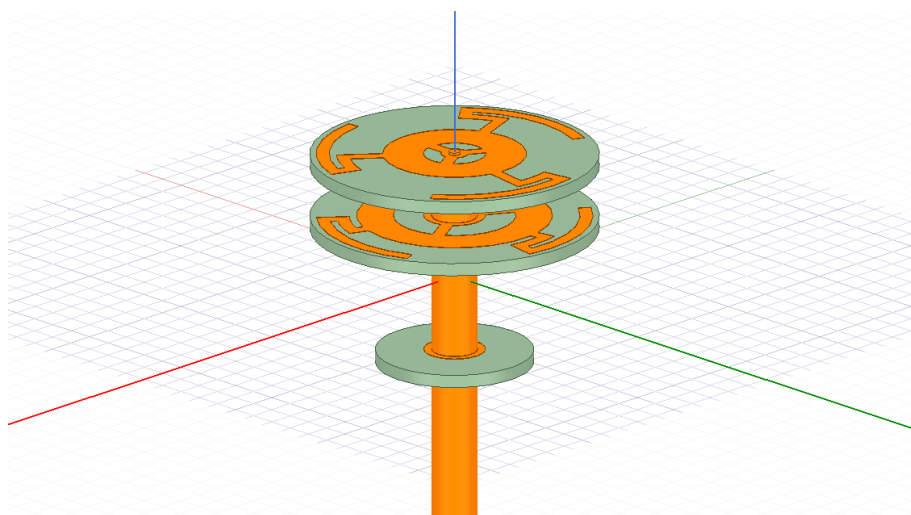


Figura 20: Replicado de la antena original en HFSS.

Una vez replicada la primera versión digital en HFSS de la antena “Pagoda” sobre la cual se basará el diseño, se comienza un proceso de parametrización de todas las diferentes variables físicas de dicha antena. Con estas medidas parametrizadas se podrán comenzar una serie de simulaciones en las cuales se irán modificando levemente estos valores con el fin de ajustar la antena a las especificaciones originales de la misma. De esta manera se podrán contrarrestar los posibles errores de medida y diseño cometidos en el proceso de replicación.

Los parámetros que se modificaran para este ajuste son:

- Distancia entre discos superior e intermedio.
- Distancia entre disco intermedio e inferior.
- Radio disco superior.
- Radio disco intermedio.

Una vez terminada esta fase de ajuste ya se dispondrá de una antena base con especificaciones idénticas a la antena Pagoda real y de la cual partir nuestro proceso de diseño.

2.3.3.2- Efecto disco inferior

En la serie de simulaciones del apartado anterior se observó que al variar la distancia entre el disco inferior y los dos discos superiores no se producían apenas cambios en la adaptación y en el diagrama de radiación de la antena.

Tras esto se comenzó un estudio más exhaustivo del fenómeno con el que se pretende determinar la posibilidad de eliminar dicho disco inferior. Esto aportaría una gran mejora en el apartado de minimización del tamaño de la antena y reducción de su complejidad.

Se realizaron dos simulaciones de la antena replicada, una con el disco inferior y otra sin él, los resultados son los siguientes:

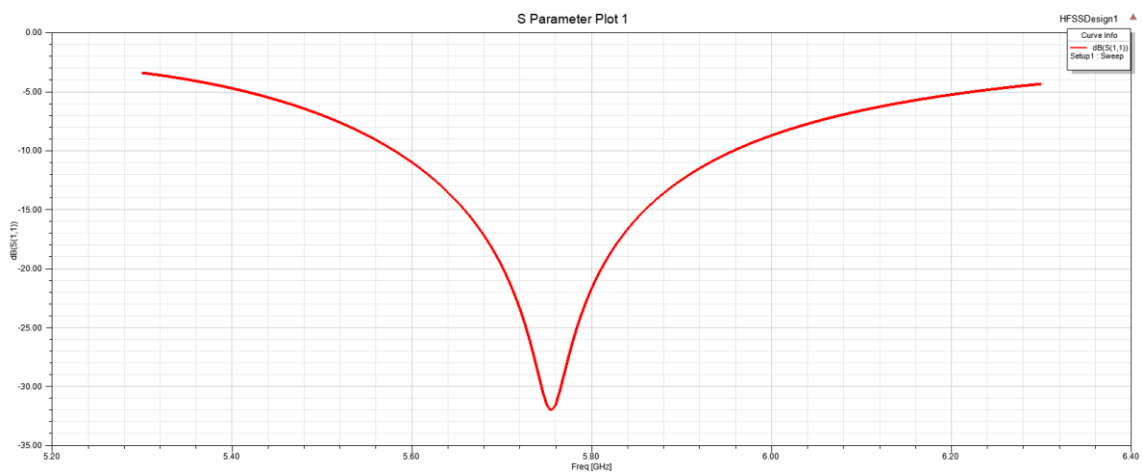


Figura 21: Parámetro S11 con disco inferior

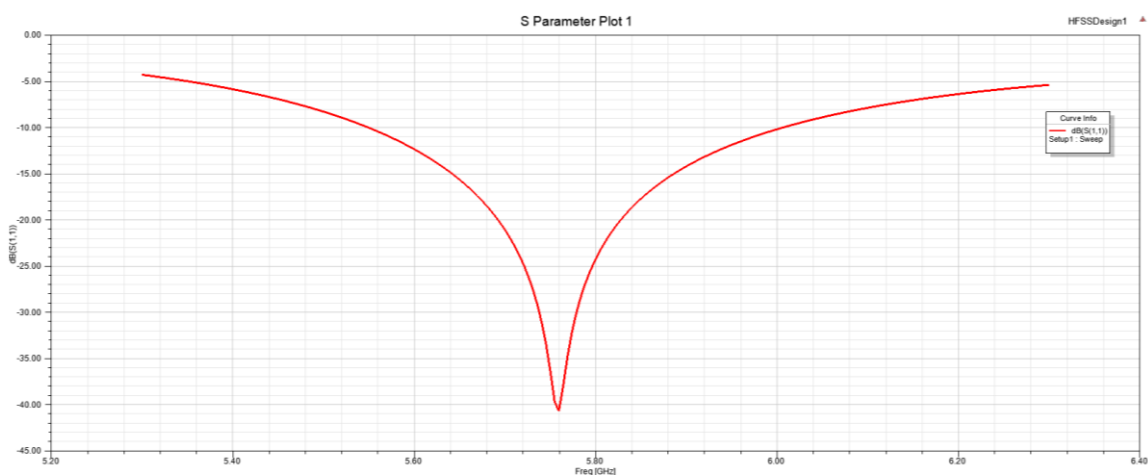


Figura 22: Parámetro S11 sin disco inferior

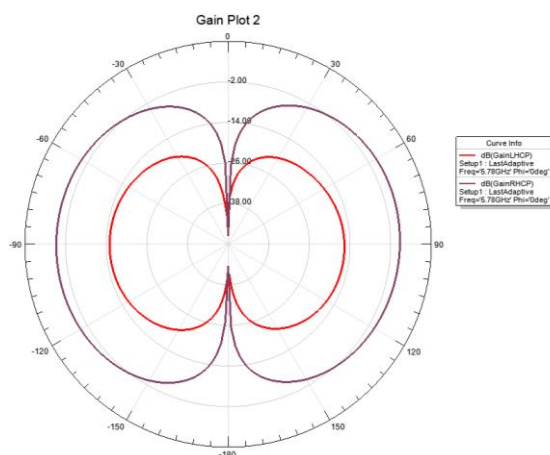


Figura 23: Diagrama de radiación de ganancia, gainRHCP (morado) y gainLHCP (rojo) para la antena con disco inferior.

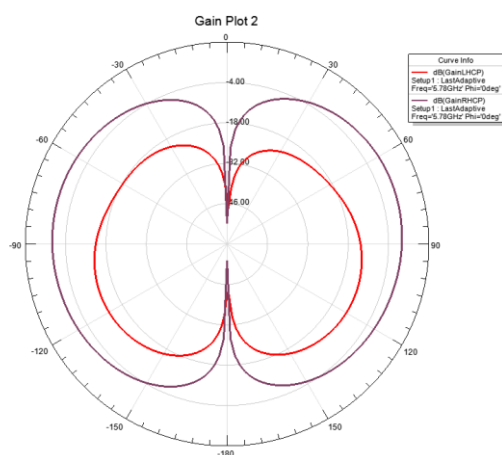


Figura 24: Diagrama de radiación de ganancia, gainRHCP (morado) y gainLHCP (rojo) para la antena sin disco inferior.

Una vez analizados los resultados anteriores se llega a las siguientes conclusiones:

- El disco inferior no afecta de ninguna manera a la adaptación de la antena.
- El disco inferior ayuda a homogenizar el diagrama de radiación mejorando el aislamiento entre polarizaciones.

De esta manera se aprecia que la antena con el disco inferior tiene un diagrama de radiación más omnidireccional que la versión sin dicho disco y que la discriminación de polarización cruzada es alrededor de 5 dB mejor.

A pesar de esto se considera mucho mayor la ventaja en cuanto a reducción de tamaño y complejidad de la antena, que supone eliminar el disco inferior, respecto a la desventaja de perder un poco de omnidireccionalidad en el diagrama de radiación y de empeorar un poco la discriminación de polarización cruzada.

Por este motivo es por el cual se decide eliminar el disco inferior de la antena 'Pagoda' original del nuevo diseño.

2.3.3.3- Diseño protector de TPU

En este apartado se va a diseñar el protector de poliuretano termoplástico (TPU) que recubrirá la antena. Los requisitos que dicho protector debe cumplir son:

- Diseño simple.
- Excelente protección ante impactos.
- Excelente protección ante el desgaste y la abrasión.
- Diseño pensado para facilitar la impresión del mismo.
- Diseño pensado para facilitar su implementación en la antena.

Dados estos requisitos se llega al siguiente a la siguiente solución para el diseño del protector.

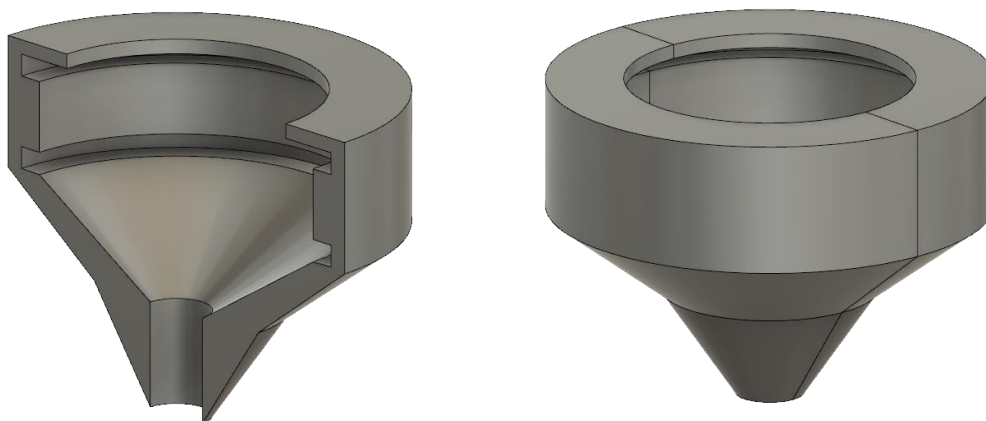


Figura 25: Modelo 3D del protector de TPU.

El protector ha sido diseñado con la ayuda del software Fusion360 de Autodesk.

Se ha diseñado de tal forma que esté formado por dos piezas independientes y totalmente idénticas, cada una de estas piezas conforma la mitad de la circunferencia que rodea la antena. Esto es así para facilitar en gran medida el proceso de montaje e impresión.

2.3.3.4- Implementación del protector de TPU en el diseño HFSS

Se modela el protector diseñado en el apartado anterior dentro de HFSS, además se parametrizan todas sus medidas para que a la hora de modificar la antena en el proceso de adaptación este se modifique también con ella.

Posteriormente se creará un nuevo material denominado TPU en el software HFSS en el cual caracterizaremos con los valores de permeabilidad relativa y tangente de pérdidas calculados en el apartado 2.3.2. Después se aplicará dicho material al protector creado.

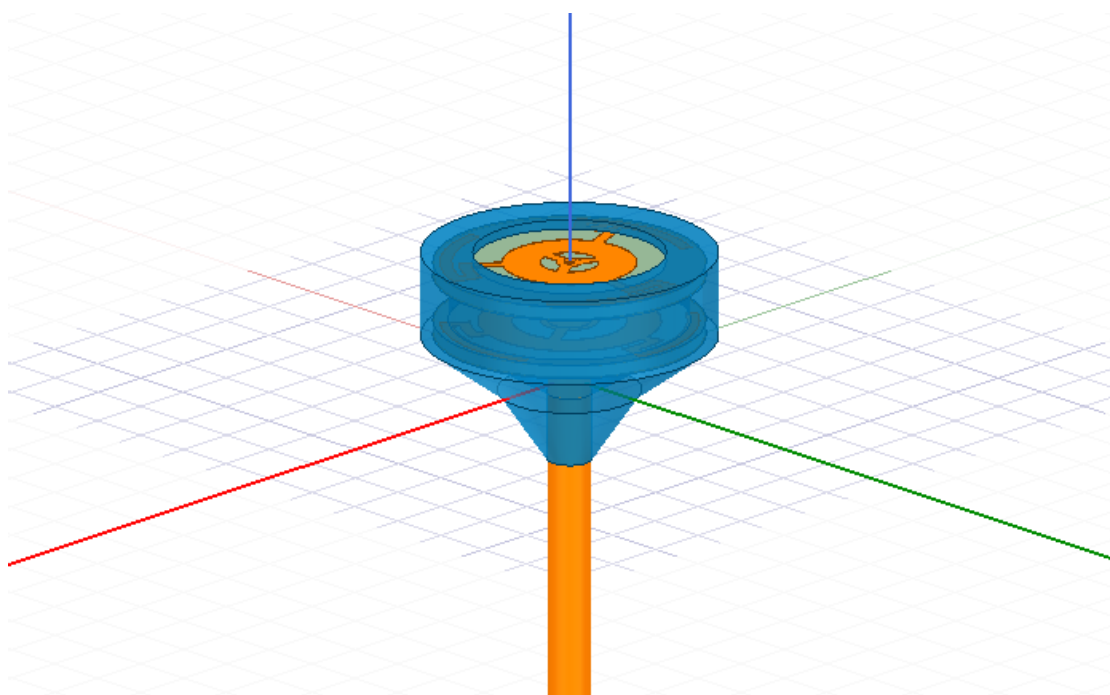


Figura 26: Modelo 3D de la antena con el protector de TPU en HFSS.

2.3.3.5- Adaptación de la antena al protector de TPU

Se realizan dos simulaciones de la antena, una con el protector implementado en el apartado anterior y otra sin él. De esta manera se pretenden observar los efectos adversos que este introduce en cuanto a la adaptación de la antena se refiere.

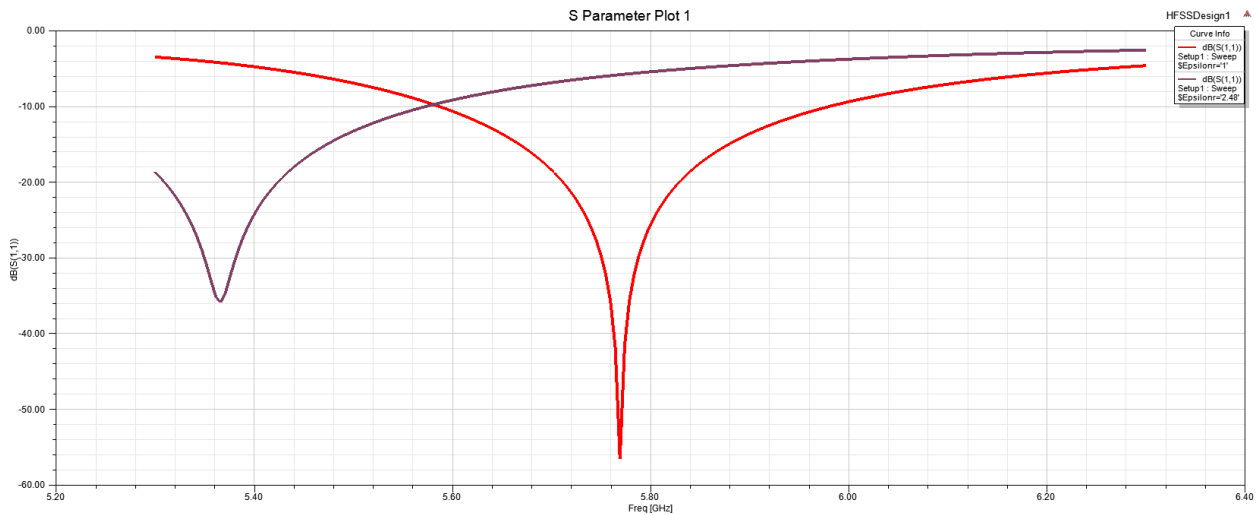


Figura 27: Grafica de los parámetros S_{11} para la antena sin el protector de TPU (rojo) y la antena con el protector de TPU (morado).

Como se esperaba el protector de TPU desadapta drásticamente la antena.

Ahora se comenzara un proceso de optimización de los parámetros de la antena en el cual por medio de una serie de simulaciones paramétricas se irán ajustando las dimensiones de los diferentes elementos de la antena, para de esta manera intentar volver adaptarla en su frecuencia de trabajo.

Los parámetros que se modificaran para este ajuste son:

- Distancia entre discos superior e intermedio.
- Longitud de los arcos de circunferencia en los discos.

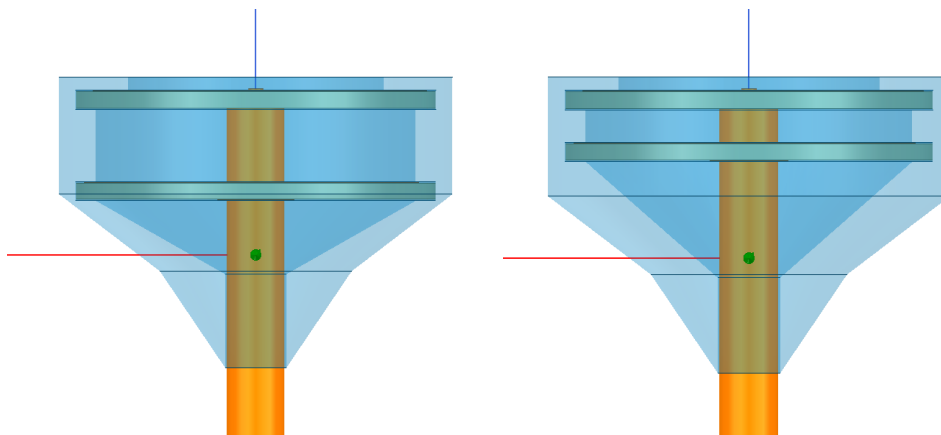


Figura 28: Variación de la distancia entre disco superior e intermedio en HFSS.

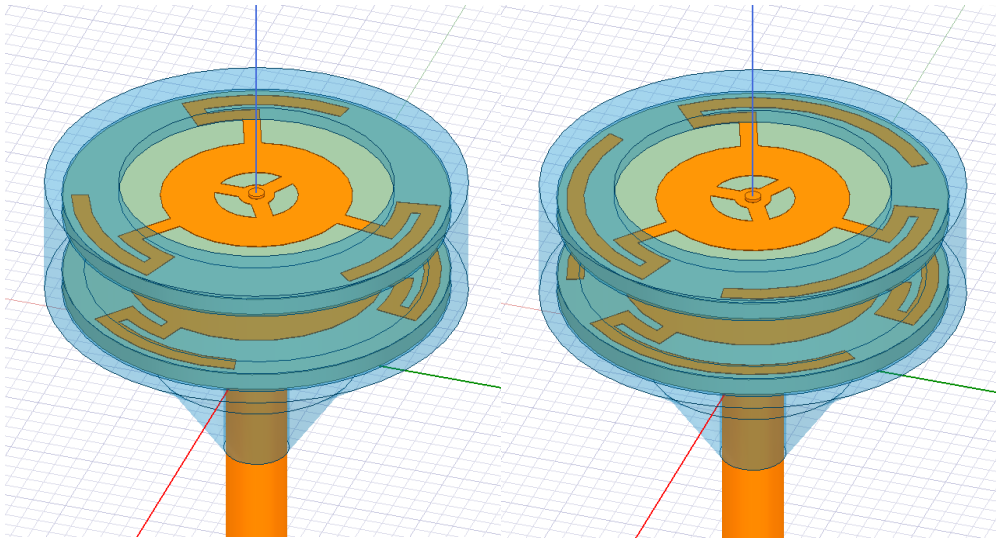


Figura 29: Variación de la longitud de los arcos de circunferencia en los discos.

Una vez terminado este proceso de optimización se llega a los siguientes resultados:

- Distancia entre discos superior e intermedio:
0.45mm menos respecto a la original.
- Longitud de los arcos de circunferencia en los discos:
6.4° más respecto a la original.

2.4- Resultados finales del diseño en HFSS

En este apartado se van a exponer los resultados obtenidos en HFSS para el diseño final de la antena.

En cuanto al parámetro S_{11} decir que está centrado en 5779 MHz, frecuencia central de la banda de canales de video, en este punto se tiene el valor mínimo de S_{11} que es de -33.31 dB. Por lo contrario los peores casos se encuentran en los canales extremos de la banda, canal 1 (5658 MHz) y canal 8 (5917 MHz). En estos dos casos el valor del parámetro S_{11} se encuentra en torno a -14,5dB.

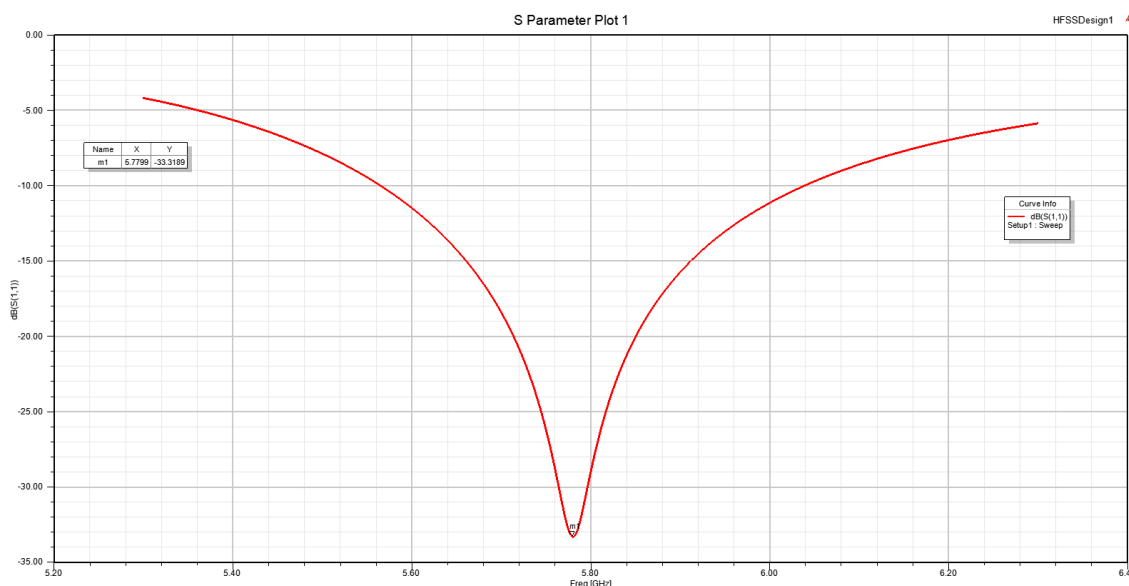


Figura 30: Parámetro S_{11} diseño final.

A continuación se va a mostrar el diagrama de radiación de la antena tanto para la ganancia como para la directividad. Se representan valores para la de polarización circular a derechas e izquierdas para todos los grados de elevación en sectores de 45° de azimut.

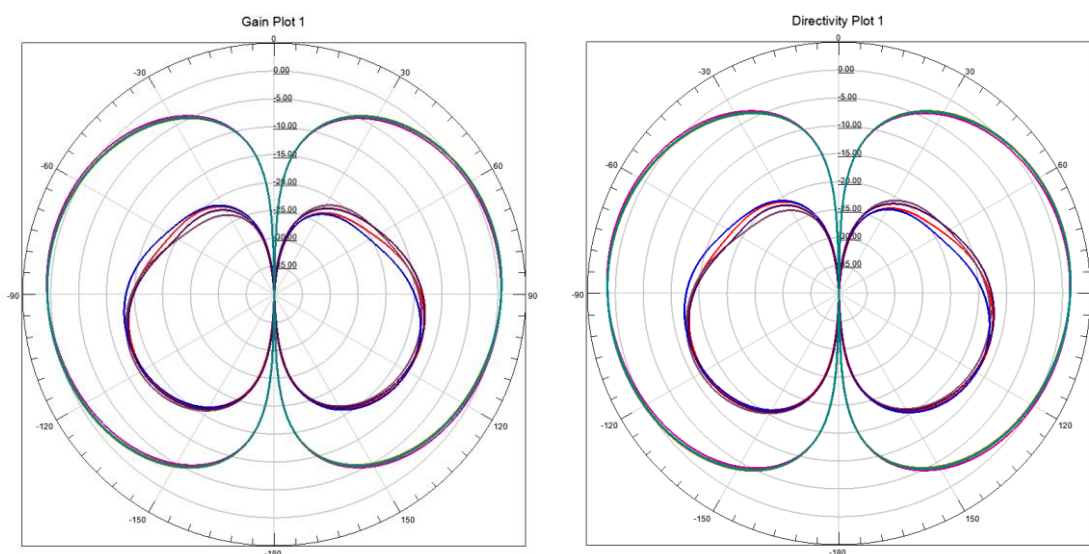


Figura 31: Diagrama de radiación para ganancia y directividad.

A la vista de los anteriores resultados se puede observar que apenas existen diferencias entre los diagramas de radiación para ganancia y para directividad. Esto quiere decir que la antena tiene buena eficiencia de radiación.

$$e = \frac{G}{D} = \frac{10^{\frac{0dB}{10}}}{10^{\frac{1dB}{10}}} = 0.7943 \approx 80\% \text{ de eficiencia de radiación.}$$

Además la geometría de radiación de la antena es de carácter omnidireccional, la cual apenas presenta variaciones en azimut.

Por último se puede apreciar que a la discriminación de polarización entre la componente RHCP y LHCP es muy buena, para observar este fenómeno con mayor detalle se va a representar el valor de relación axial entre las dos componentes para todos los ángulos de elevación y en sectores de 45º de azimut.

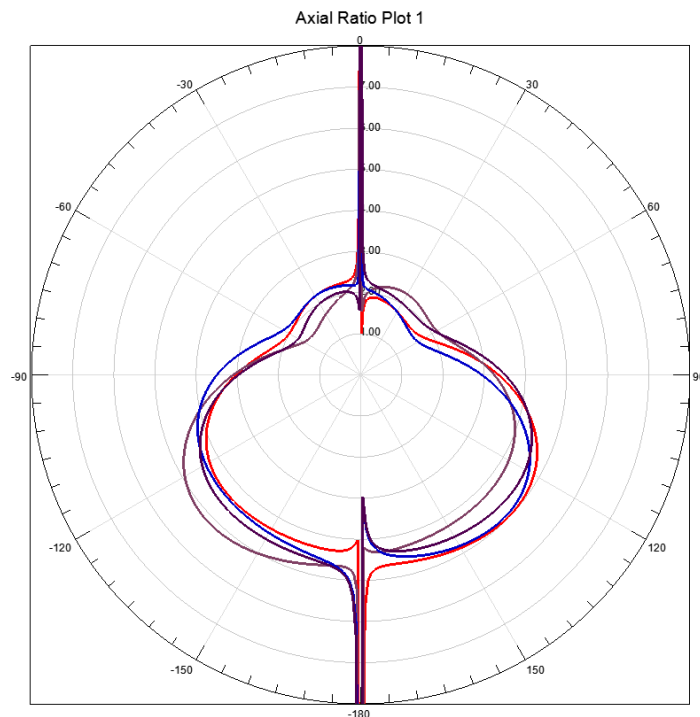


Figura 32: Relación axial diseño final.

El peor caso de relación axial en el diagrama de radiación de la antena está presente en el sector inferior de la misma. A pesar de esto en este caso nunca se superan los 5 dB de relación axial.

2.5- Construcción de la antena

En este apartado se va a explicar detalladamente el proceso completo de construcción de la antena.

2.5.1- Generación de archivos Gerber

Para la fabricación de los discos de FR4 en un fabricante de PCBs externo se necesitan unos tipos de archivo estándar llamados archivos Gerber. Los cuales son necesarios enviar al fabricante para que este procese el trabajo indicado.

HFSS no es capaz por si solo de exportar este tipo de archivos, para ello se necesita un programa dedicado de diseño PCB. Debido a esto de HFSS se exportan todas las diferentes geometrías de la antena en un archivo formato DXF (Drawing Exchange Format), este archivo contiene los vectores de todas las diferentes geometrías de la antena vistas en planta.

Este archivo se introduce posteriormente en un programa de diseño CAD, en este caso en concreto se utiliza AutoCAD 2018 de Autodesk. Dentro de AutoCAD se separan los vectores de las diferentes geometrías de la antena y se exportan en archivos DXF individuales.

Los diferentes archivos DXF exportados en AutoCAD corresponden a las vectores de las siguientes geometrías de los discos superior e inferior de la antena:

- Circunferencia externa disco superior e inferior.
- Taladro disco superior.
- Taladro disco inferior.
- Pista superior del disco superior.
- Pista inferior del disco superior.
- Pista superior del disco inferior.
- Pista inferior del disco inferior.

Una vez se tengan todos estos archivos se comienza el proceso de diseño de las PCBs, para ello se debe utilizar un programa dedicado al diseño de circuitos impresos. En este caso se ha optado por utilizar Altium Designer, ya que es uno de los programas más completos y avanzados del mercado para el diseño de PCBs.

En Altium Designer se importa en primer lugar el archivo DXF que contiene la circunferencia externa de los discos. Con esta circunferencia delimitaremos el “board outline” de la PCB. Posteriormente se importan los archivos DXF que contiene las geometrías de las pistas superior e inferior y se colocan en sus correspondientes capas. Cuando estos vectores estén en su capa se realiza una operación de relleno en la cual se indica que el interior de los vectores cerrados será de cobre, para así generar las pistas. Por último se generaran los taladros centrales de los discos y las marcas con el nombre de la antena en la capa denominada “silkscreen”.

Completados los pasos anteriores ya se tendrá diseñada la PCB y el último paso que falta es el de exportar lo archivos gerber. Para ello se sigue el procedimiento indicado por Altium Designer tras el cual se obtendrán todos los archivos gerber dentro de una carpeta previamente seleccionada.

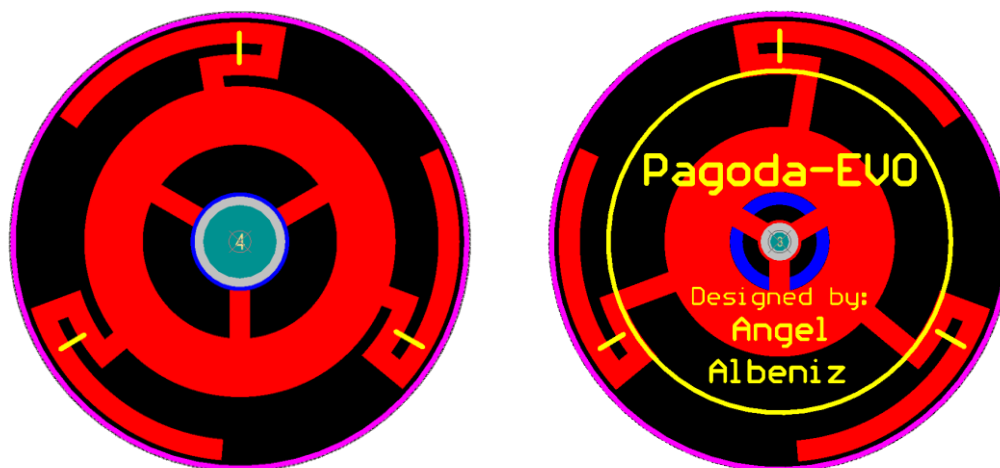


Figura 33: Diseño de las PCBs del disco superior e inferior en Altium Designer

Una vez en obtenidos los archivos gerber se necesita buscar un fabricante de PCBs el cual fabrique los discos a partir de los archivos gerber. El fabricante que se ha seleccionado para esta tarea es JLCPCB, empresa especializada en la fabricación de PCBs para prototipo. Esta empresa ofrece precios muy bajos, calidades y tolerancias excepcionales además de ser muy fácil de trabajar con ella debido a su interfaz web la cual permite realizar este proceso en cuestión de minutos.



Figura 34: Discos fabricados por JLCPCB.

2.5.2- Diseño del útil de construcción

En el proceso de ensamblado de la antena, en el cual se deben soldar el disco superior e inferior al cable coaxial, se necesitan cumplir unas tolerancias muy pequeñas. Estas tolerancias son especialmente importantes en la distancia entre el disco superior e inferior, ya que variaciones de decimas de milímetro provocan grandes cambios en la adaptación de la antena.

Ya que se deben cumplir estas tolerancias tan finas en el proceso de ensamblado se decide diseñar y fabricar un útil de construcción el cual ayude a realizar dicha tarea de ensamblado.

Este útil debe de cumplir los siguientes requisitos:

- Preciso, debe de ser capaz de cumplir las tolerancias exigidas con consistencia.
- Sencillo y replicable, debe ser fácil de construir y replicar.
- Debe de agilizar el proceso de ensamblado sin introducir complejidad extra.

Para cumplir estos requisitos se decide diseñar un útil mediante la técnica de impresión 3D. De esta manera con tener únicamente el archivo 3D del modelo y una impresora 3D doméstica se podrá replicar el útil. La técnica de impresión 3D permite alcanzar tolerancias muy pequeñas, suficientes para esta aplicación. Además con esta técnica se puede diseñar una geometría muy específica la cual facilite considerablemente el proceso de ensamblado.

El útil de construcción diseñado para esta función es el siguiente:

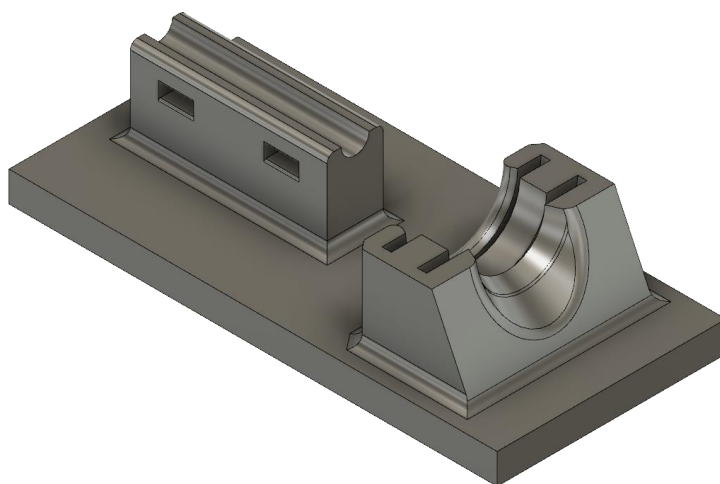


Figura 35: Modelo 3D del útil de trabajo.

2.5.3- Fabricación de los protectores de TPU

En este apartado se va a explicar el proceso de construcción de los protectores de TPU diseñados en el apartado 2.3.3.3.

Para la impresión de TPU o poliuretano termoplástico, se necesitan unos ajustes de impresión especiales, que dependen de diversos factores. Con una serie de impresiones de prueba se fueron determinando los ajustes de impresión óptimos para la pieza. Estos ajustes son:

- Infill density: 100%
- Printing Temperature: 220°C
- Flow: 110%
- Retraction Distance: 2.5mm
- Print Speed: 20mm/s
- Travel Speed: 60mm/s
- Generate Support: FALSE

Por carácter general el TPU siempre se debe imprimir muy despacio (20mm/s), con una temperatura de impresión generalmente alta (220°C), con un flow algo mayor al 100% y con la retracción deshabilitada o al menos reducido su valor. Además se opta por no utilizar soportes ya que la geometría de la pieza lo permite y el proceso de retirado de los mismos es muy costoso debido a la naturaleza elástica del TPU.

Por último la orientación de impresión escogida para las piezas es boca abajo con la parte superior del protector en contacto con la cama de impresión, de esta manera es como mejores resultados se obtiene en cuanto a integridad estructural y limpieza en las impresiones.

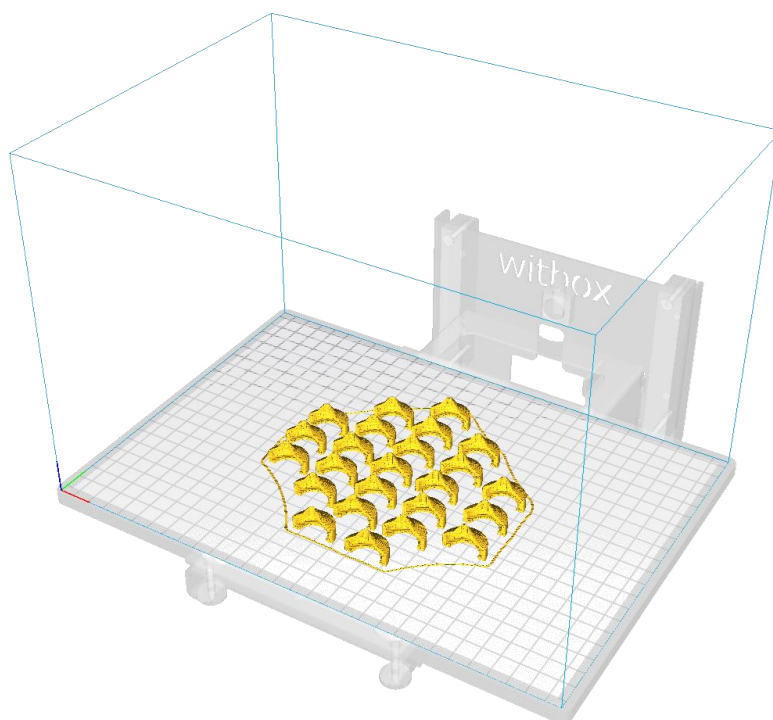


Figura 36: Protectores de TPU dentro del software de slicing CURA

2.5.4- Proceso de montaje

En este apartado se va a explicar detalladamente el completo proceso de ensamblado de la antena.

El primer paso es cortar a la longitud deseada un segmento de cable coaxial tipo RG402, es obligatorio que sea este tipo exacto de coaxial ya que los discos de la antena han sido diseñados teniendo en cuenta el diámetro de la cubierta exterior y del conductor interior de dicho cable, 3.58mm y 1.79mm respectivamente.

Tras esto se suelda en un extremo el conector que se quiera, en este caso en concreto se usaron cables RG402 de 30 cm de largo con conectores SMA macho en ambos extremos, los cuales al cortarlos por la mitad se obtienen dos segmentos de 15 cm cada uno con un conector SMA macho en uno de sus extremos.

Se usa un conector SMA ya que es el más común en los transmisores y receptores de video, otras opciones menos comunes son el conector SMA-RP o el conector MMCX el cual se está comenzando a popularizar en este mercado.

El segundo paso será pelar el extremo sin conector del cable coaxial, dejando en torno a 3 o 4 mm de conductor interior al descubierto.

Tras esto se introducen el disco inferior en el cable coaxial y se desliza hasta el final del mismo, de esta manera no molestará en el proceso de soldadura del disco superior. Para dicho proceso se introducen los 3 o 4 mm de conductor interior en el taladro del disco superior y se suelda a la pista superior del disco. Si una vez hecha la soldadura sobresale hacia arriba un segmento del conductor interior, este se puede cortar con la ayuda de unas tenazas para así dejar la soldadura enrasada con el plano del disco.

Una vez soldada la pista superior se suelda la pista inferior al conductor exterior del coaxial, de esta manera se deja completamente fijado del disco superior. Se debe intentar usar la menor cantidad de estaño posible en el proceso de soldadura, ya que un exceso del mismo puede afectar al funcionamiento de la antena, para ello se recomienda usar una temperatura de estañador alta, entre 400°C - 450°C, y aplicar el calor a la cubierta exterior del coaxial y no a la pista del disco.

Una vez soldado el disco superior se desliza hacia su posición el disco inferior introducido con anterioridad, para soldar este disco en su posición exacta se inserta el cable y los dos discos en el útil de construcción fabricado para este proceso. De esta manera la antena queda completamente fijada en posición.

Antes de comenzar el proceso de soldadura del disco inferior en el útil de construcción se debe de asegurar que los marcadores blancos de los discos están perfectamente alineados. Ya que un mínimo desalineamiento axial entre los discos empeorará la relación axial y adaptación de la antena.

Una vez estén los discos en su correcta posición se comienza el proceso de soldadura del disco inferior, para ello se aplicará calor en el recubrimiento exterior del cable coaxial desde la parte inferior del disco, se irá aplicando estaño desde esta posición y se dejará que fluya hasta la parte superior del disco por acción capilar. Al igual que con el disco superior se recomienda no usar excesivo estaño ya que este puede causar efectos adversos en el funcionamiento de la antena.

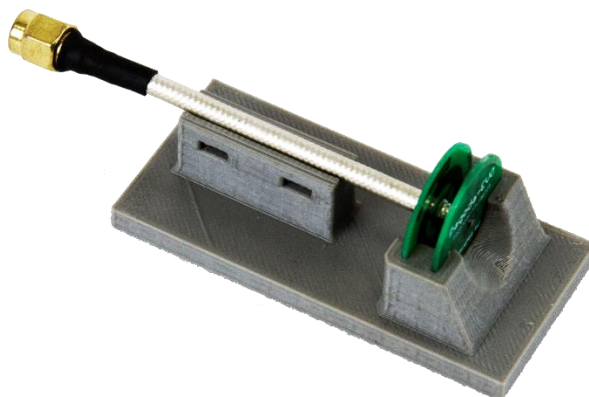


Figura 37: Antena insertada en el útil de soldadura.

Por último se deja enfriar la antena y posteriormente se retira del útil de construcción, tras esto el último paso a completar es el de instalar el protector de TPU fabricado en el apartado anterior. Para ello se colocan dos de las piezas que componen el protector y se fijan entre sí con un segmento de tubo termoretráctil o en su defecto con una o dos pasadas de cinta aislante. Como ya se demostrara en apartados posteriores esta fina capa de termoretráctil o cinta aislante no afecta al funcionamiento total de la antena.

Una vez completados todos estos pasos ya se tendrá la antena terminada y lista para su utilización.



Figura 38: Antenas terminadas.

2.6- Testeo de la antena

En este apartado se va explicar el proceso y resultados del testeo de las antenas construidas. Este proceso se lleva a cabo dentro de la cámara anecoica de la Universidad Pública de Navarra y utilizando para ello el analizador vectorial de redes E8361C de la marca Agilent Technologies.

En este proceso de testeo de las antenas se tomaran únicamente medidas del parámetro S_{11} de las mismas.

El primer paso para tomar las medidas es calibrar el analizador vectorial de redes, para ello se llevara a cabo una calibración completa de un único puerto. Una vez terminada esta calibración se comienza el proceso de medida. En total se van a tomar medidas de 2 antenas diferentes construidas de forma idéntica. De esta manera también se podrá apreciar las posibles variaciones entre las mismas introducidas en el proceso de ensamblado.

Una vez tomadas las medidas se guardan los datos para su posterior procesado y graficado. Este proceso se realiza utilizando unas sencillas funciones programadas en MatLab.

A continuación se muestran las gráficas del parámetro S_{11} de ambas antenas. En dichas gráficas aparecen marcados las frecuencias centrales de los 8 canales de difusión de video de nuestra banda de trabajo, para así facilitar visualización del funcionamiento de la antena en cada uno de dichos canales.

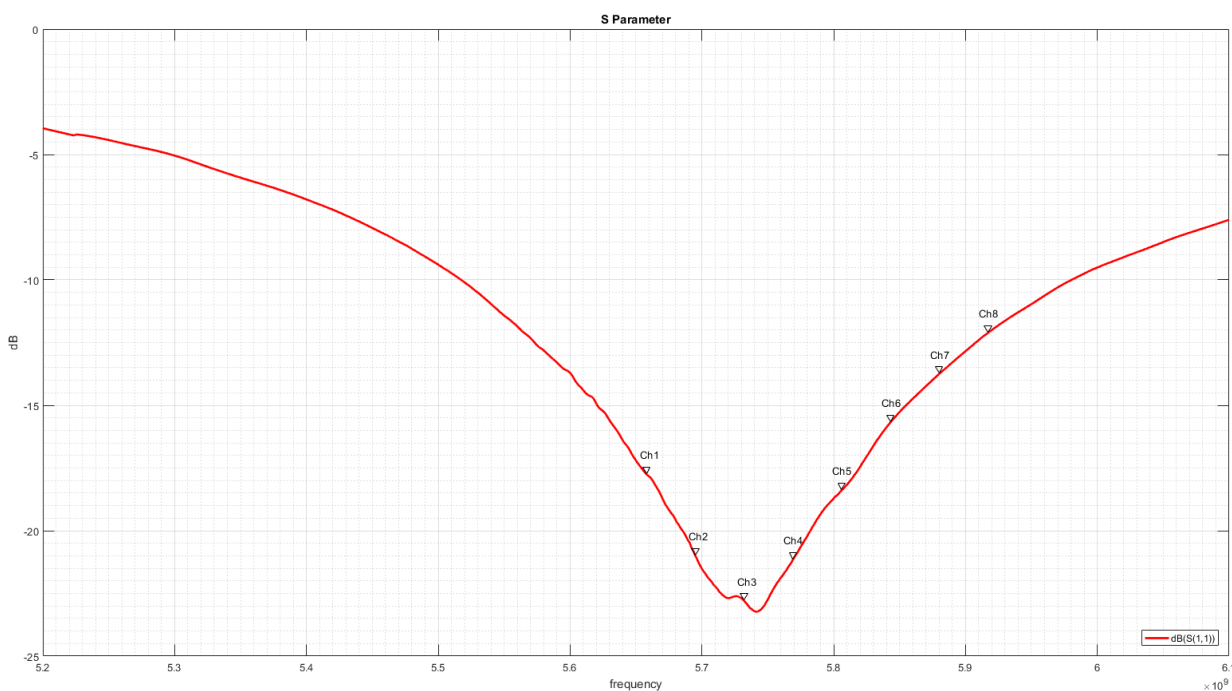


Figura 39: Parámetro S_{11} de la antena número 1.

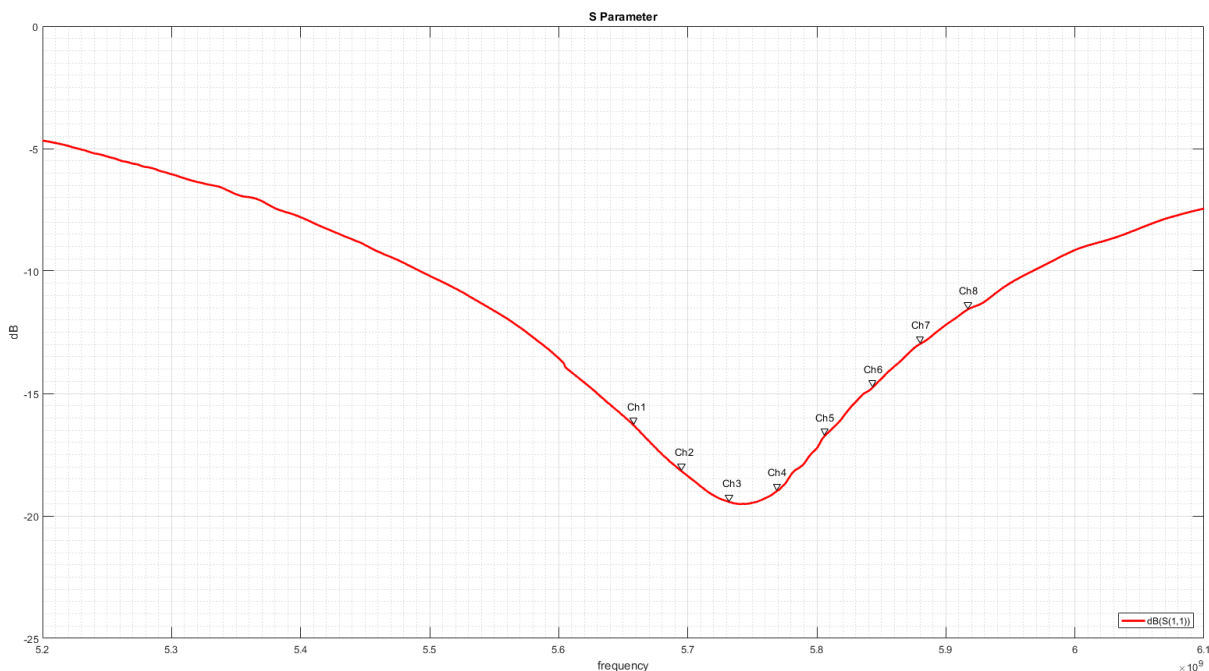


Figura 40: Parámetro S_{11} de la antena número 2.

Lo primero que se observa en las medidas es que existe una ligera diferencia entre ambas antenas, lo que sugiere que el proceso de ensamblado introduce ligeras desviaciones. Además se aprecia que en ambas antenas la frecuencia central de resonancia está levemente desplazada hacia frecuencias más bajas.

A pesar de esto los parámetros S_{11} de ambas antenas se consideran adecuados ya que en ninguna de las dos se superan los -12 dB de S_{11} para ninguno de los 8 canales. El peor de los casos se encuentra en el canal número 8 donde el S_{11} es de entorno -12 dB.

Por último se antes de terminar el proceso de testeo se repiten las medidas de S_{11} en ambas antenas, pero en este caso se retiran previamente los protectores de TPU de las mismas. De esta manera se quiere apreciar de forma física los efectos favorables que estos protectores introducen en el funcionamiento global de la antena.

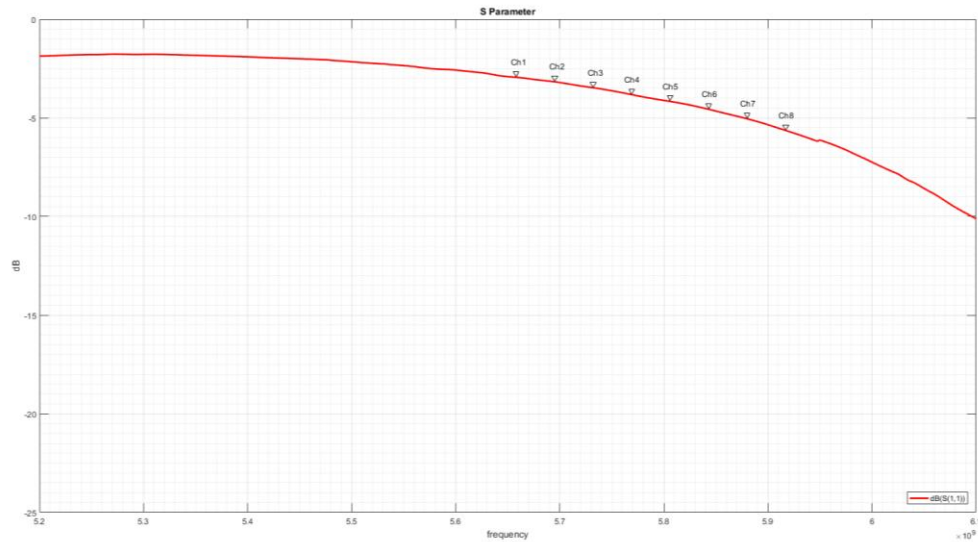


Figura 41: Parámetro S_{11} de la antena número 1 sin protector de TPU.

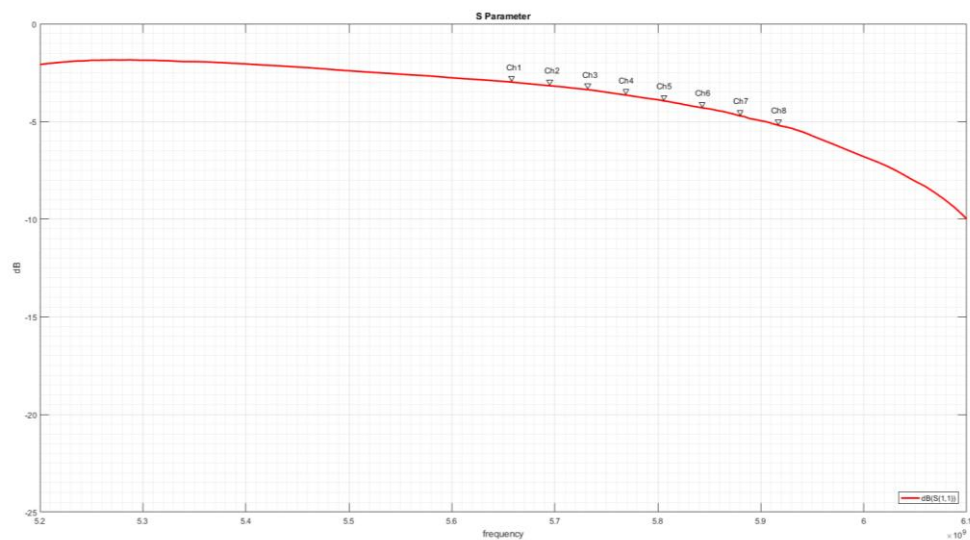


Figura 42: Parámetro S_{11} de la antena número 2 sin protector de TPU.

Los resultados muestran que las antenas sin sus correspondientes protectores de TPU no se comportan correctamente, superando siempre los -5 dB de S_{11} , esto confirma el comportamiento esperado.

Al igual que en los resultados obtenidos en las simulaciones en HFSS el protector de TPU es totalmente necesario, ya que el funcionamiento de la antena ha sido optimizado teniendo en cuenta dicho protector y sin él su funcionamiento no es el correcto.

2.7- Conclusiones y mejoras

Una vez terminado el proceso de diseño, fabricación y testeo de la antena se llegan a las siguientes conclusiones sobre la misma.

Lo primero que se debe decir es que se han cumplido por completo todos los objetivos propuestos para el diseño. Ya que se ha conseguido diseñar una nueva antena la cual cuenta con una protección de TPU y está adaptada a la misma para conseguir con ella resultados equivalentes a los que se consiguen en la antena pagoda original sin ningún tipo protección.

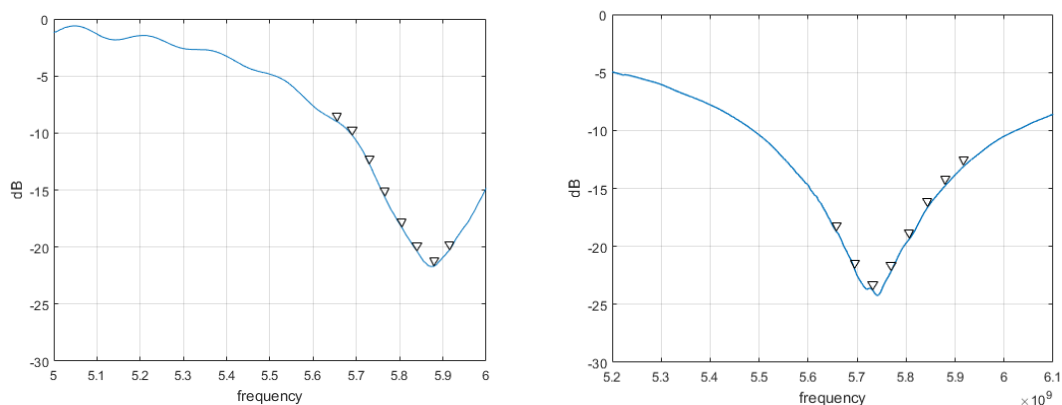


Figura 43: Parámetro S_{11} de la antena pagoda original (izquierda) y parámetro S_{11} nueva antena (derecha).

Además se mejoran considerablemente los resultados obtenidos respecto a cualquiera de las antenas testeadas en el estudio las cuales utilizaran cualquier tipo de protección física. Esto se debe a que ninguna de ellas había tenido en cuenta el efecto de dichas protecciones en el proceso de diseño. Esta es sin duda la mayor ventaja que esta antena presenta frente a las demás, ya que como ya se había comentado en el apartado 2.1, cualquier antena que no disponga de ningún tipo de protección física no es apta para su uso en este tipo de aeronaves.

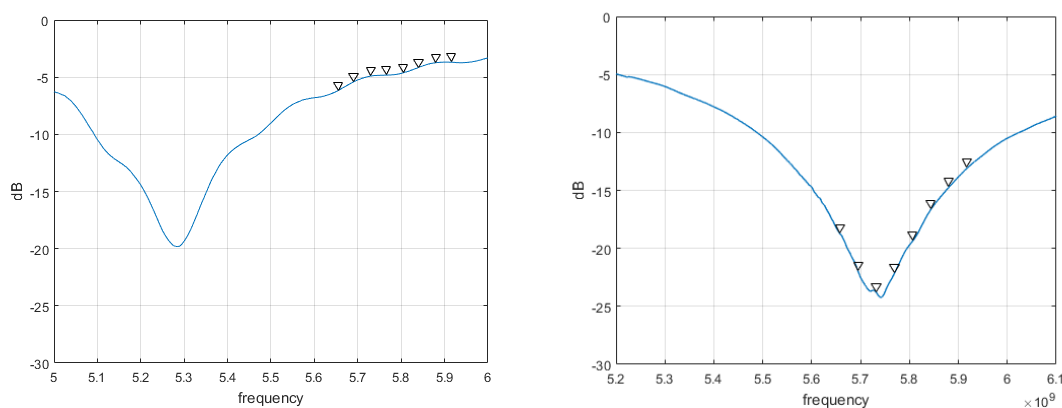


Figura 44: Parámetro S_{11} de la antena pagoda original con protector de TPU (izquierda) y parámetro S_{11} nueva antena (derecha).

Por otra parte, se cree que la ligera desviación hacia frecuencias más bajas en la adaptación de la antena se debe a pequeñas variaciones en la permeabilidad relativa del sustrato FR4 que el fabricante de las PCBs ha utilizado en el proceso de fabricación de las mismas. Podría ser interesante conocer las propiedades dieléctricas del FR4 usado al igual que se ha hecho con el TPU.

El sustrato de FR4 es un material compuesto fabricado a partir de fibra de vidrio dispuesta en capas adheridas entre sí con resina epoxi, esto hace que el sustrato FR4 tenga ligeras variaciones en sus características dieléctricas dependiendo del proceso e fabricación y fabricante del mismo.

Para tratar de corregir la desviación en frecuencia que sufre la antena se propone realizar una serie de simulaciones paramétricas en HFSS en las cuales se varié el valor de la permeabilidad relativa del sustrato de FR4, hasta conseguir unos resultados con la misma desviación en frecuencia observada en los resultados reales, de esta manera se conseguirá un valor de permeabilidad relativa más cercano al del FR4 utilizado por el fabricante.

Una vez obtenido este nuevo valor, se repetirá el proceso de diseño de la antena ya explicado en el apartado 2.3.3.5 para conseguir readaptar la frecuencia central de nuestra banda de trabajo.

De esta manera se podrá volver a construir la antena, esta vez teniendo en cuenta la desviación en frecuencia introducida por la variación en la permeabilidad relativa de sustrato FR4.

3- Diseño de receptor con diversidad de antenas

3.1- Objetivo:

Diseñar y fabricar un receptor de señal de video, para drones de carreras/ocio, el cual cumpla las siguientes características:

- 1- Compatibilidad con los transmisores de video analógicos usados en drones de carreras/ocio.
- 2- Implementar un sistema de diversidad de antenas inteligente el cual se encargue de seleccionar adecuadamente la señal de video con mayor calidad en cada momento.
- 3- Implementar funcionalidad extra como, display gráfico, selección automática de canal, memoria para guardar canales favoritos, escáner de bandas.
- 4- Portable, tamaño y peso minimizados al máximo.

3.2- Diseño del receptor:

Una vez estipulado el objetivo se plantea el diseño del receptor para cumplir todas las características dadas.

Tras un riguroso proceso de documentación e investigación se ha decidido basar el receptor en el módulo RX5808, el cual realiza el trabajo de recibir y demodular la señal de video analógica, además es totalmente compatible con los transmisores de video utilizados en los drones de carreras.

Se utilizarán dos módulos RX5808 conectados a diferentes antenas con el fin de conseguir diversidad de antenas.

El sistema de control estará basado en arduino, debido a la gran variedad de equipos disponibles y a su facilidad de uso e implementación. Más en concreto se usará una placa no oficial denominada "Arduino Pro Mini". Se escoge dicha placa ya que es la placa de menor tamaño que implementa la funcionalidad completa de un arduino convencional.

Esta placa cargada con el firmware correspondiente será la encargada de implementar la diversidad de antenas, seleccionando la mejor señal entre ambos módulos receptores. Además también será la encargada de gobernar el display gráfico e implementar todas las funcionalidades extra mencionadas anteriormente.

Y por último se trata de encontrar un circuito electrónico capaz de conmutar entre las dos señales de video analógicas provenientes de los dos módulos receptores, para así tener una única a la salida. Este circuito electrónico estará gobernado por la placa arduino, el cual le indicará cuál de las dos señales conmutar a la salida del receptor.

El circuito electrónico que se ha seleccionado para dicha función es el "CD4066B" CMOS Quad Bilateral Switch de Texas Instruments.

A continuación se van a detallar todas las características y función dentro de nuestro diseño, de todos los componentes seleccionados para el mismo.

3.2.1- Componentes

Módulo RX5808:

Es un módulo receptor basado en el chip “RTC6715” del fabricante RichWave. Este chip es un receptor FM altamente integrado para aplicaciones en la banda de 5.8GHz con demodulación FM. El cual incluye un amplificador de bajo ruido, un mixer, un amplificador IF, un demodulador FM, demoduladores de audio, amplificadores de audio y un AGC (automatic gain control).

La banda de frecuencias de RF que este receptor admite está comprendida entre 5645MHz y 5945MHz, la cual cubre perfectamente todos los canales de transmisión de video analógico utilizados en esta aplicación. La frecuencia intermedia de receptor es de 480MHz, para ello la el rango de frecuencias de oscilador generadas por el VCO varía entre 5174MHz y 5465MHz.

La sensibilidad mínima del receptor está limitada por la relación señal a ruido a la entrada de demodulador FM, esta SNR debe de ser siempre mayor que 45 dB. Siendo este el factor limitante la sensibilidad máxima que se consigue en la entrada del receptor es de -85 dBm.

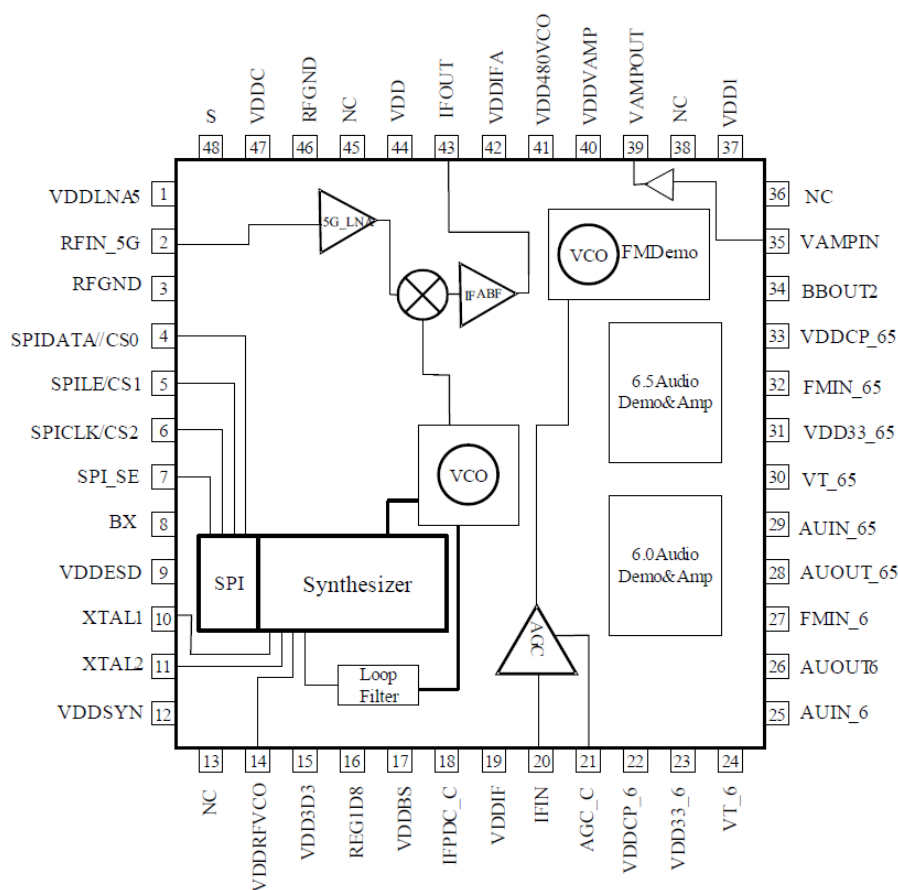


Figura 45: Diagrama RTC6715

Además una de sus carteristas clave y por la cual ha sido escogido, es que dispone de una señal analógica de salida RSSI (Radio Signal Strength Indicator), con la cual se puede monitorizar a tiempo real la potencia de señal que llega al receptor. Tiene una escala lineal de 0.5v a 1.1v, siendo 0.5v el valor de potencia de señal mínimo a la entrada, entorno a unos -90 dBm y 1.1v el valor de potencia máxima, entorno a unos 5 dBm. Esta señal se muestrea en la placa arduino y permite que esta decida cuál de los dos receptores tiene mejor señal que cada instante.

Otra característica muy importante del chip es que dispone de una interfaz SPI (Serial Peripheral Interface). Mediante dicha interfaz se puede interactuar con el modulo modificando sus registros de memoria.

La aplicación más directa de esta interfaz es la de poder modificar los factores de división del sintetizador y de esta manera variar la frecuencia de oscilador generada por el VCO. Así se consigue seleccionar la frecuencia central del canal que se baja a frecuencia FI, y se desmodula en el demodulador de FM.

Para ello se conecta la placa arduino al módulo receptor mediante la interfaz SPI, así la placa arduino será la encargada de modificar los registros de memoria del módulo receptor.

Por ultimo decir que este chip viene encapsulado en el módulo RX5808 el cual integra diversos componentes como el cristal de 8 MHz que sirve de frecuencia de referencia para el sintetizador, un filtro paso banda para frecuencia intermedia y un regulador de voltaje para gestionar la alimentación del módulo.

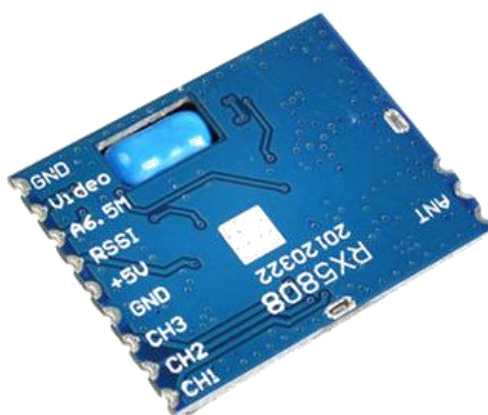


Figura 46: Módulo RX5808

Arduino Pro Mini:

Es una placa arduino basada en el microprocesador ATmega328P con un oscilador a 16 MHz, lo cual hace que tenga las mismas capacidades que una placa arduino convencional. Pero lo que hace especial a esta es su tamaño reducido, lo cual se consigue quitando la interfaz USB de programación y miniaturizando el resto de componentes.

Esta placa será la encargada de realizar las siguientes funciones:

- 1- Muestrear y cuantificar las dos señales analógicas de RSSI provenientes de los dos módulos receptores RX5808 para después compararlas con un comparador con histéresis regulable que evite rebotes indeseados. La salida de este comparador será enviada al multiplexor analógico CD4066B que será el encargado de conmutar a la salida del receptor la señal de video con mejor calidad en cada momento.
- 2- Gobernar un firmware libre que otorgue al receptor funcionalidad extra, como la capacidad de tener memoria y guardar canales favoritos, escáner de bandas para facilitar la búsqueda, display grafico etc. Además de controlar las interfaces de usuario, interfaces de entrada (Botones) y salida (display OLED, buzzer).

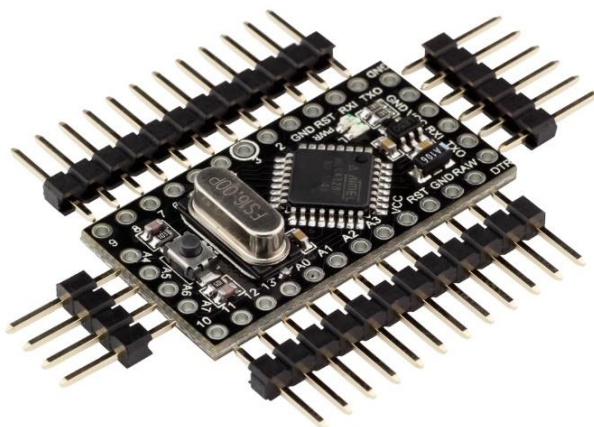


Figura 47: Arduino Pro Mini.

CD4066B (CMOS Quad Bilateral Switch):

El CD4066B es un interruptor bilateral cuádruple diseñado para la transmisión o multiplexación de señales analógicas. El dispositivo cuenta con cuatro interruptores CMOS bilaterales, cada uno de ellos con controles independientes.

En este caso únicamente se utilizarán dos de ellos, uno para cada señal de video proveniente de los dos receptores RX5808. Las salidas de ambos interruptores CMOS estarán cortocircuitadas entre sí para utilizarlo a modo de multiplexor. Además se le conectarán a las dos entradas independientes de control de estos dos interruptores CMOS, dos señales digitales procedentes de la placa arduino que serán las encargadas de gobernar el funcionamiento del multiplexor.



Figura 49: CD4066B package.

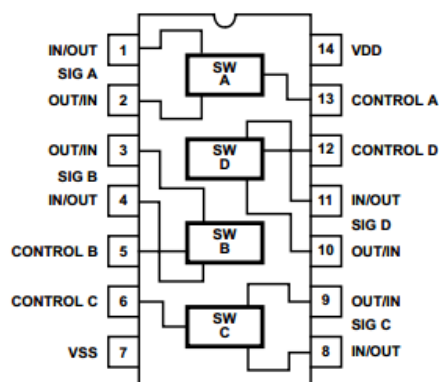


Figura 48: CD4066B pinout.

Display OLED:

Es un display OLED monocromático de 0.96 pulgadas de tamaño y 128x64 píxeles de resolución, que se comunica mediante el bus de comunicaciones i2c. Se ha escogido este display debido a su reducido tamaño y su alta resolución, la cual permite mostrar más información en una única pantalla. Además su comunicación mediante el bus I2c la hace muy sencilla de implementar con la placa arduino.



Figura 50: Display OLED.

Regulador de voltaje:

Ya que el receptor está pensado para ser un dispositivo portátil estará por tanto alimentado por medio de baterías. Además para aumentar su versatilidad se quiere garantizar su correcto funcionamiento con baterías de diferentes tecnologías y voltajes.

Debido a esto se necesita de la circuitería necesaria para regular estos voltajes variables que nos proporcionan los diferentes tipos de baterías, a los 5v con los que se alimenta toda la electrónica del receptor.

Para esta función se ha seleccionado un BEC (Battery eliminator circuit) que soporta voltajes de entrada de entre 7 y 21 voltios, con una salida regulada de 5v a una corriente máxima de 1.5 amperios (muy sobredimensionado para el consumo total del receptor).

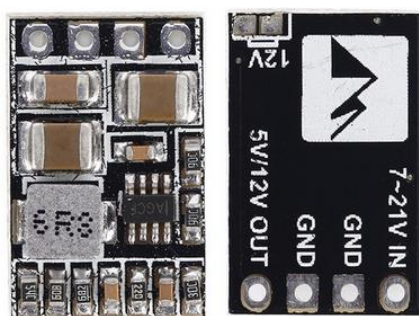


Figura 51: BEC (7v-21v)/5v.

Otros:

- 1-Resistencias (Pull-Down): Necesarias para el correcto funcionamiento y conexionado de la electrónica.
- 2-Botones: Son la interfaz con el usuario, mediante los cuales permiten navegar por los menús.
- 3-Buzzer: Interfaz de salida acústica para alarmas y avisos.



Figura 52: Resistencia.



Figura 53: Botón.



Figura 54: Buzzer.

3.2.2- Firmware

Para la realización de este proyecto se barajó la opción de programar un firmware desde cero para la placa arduino, pero al final se optó por modificar una versión ya existente del firmware libre “rx5808-pro”.

Esto otorga varias ventajas, la primera es que de esta manera se podrá hacer uso de todas las funcionalidades extra que este firmware ya integra, y que de otra manera hubiesen sido muy costosas de programar desde cero. Además las modificaciones en el código que hay que realizar a dicho firmware para que funcione correctamente en el dispositivo son mínimas. Habrá que reconfigurar los puertos utilizados en la placa arduino con sus funcionalidades correspondientes.

En firmware “rx5808-pro” incluye las siguientes funcionalidades:

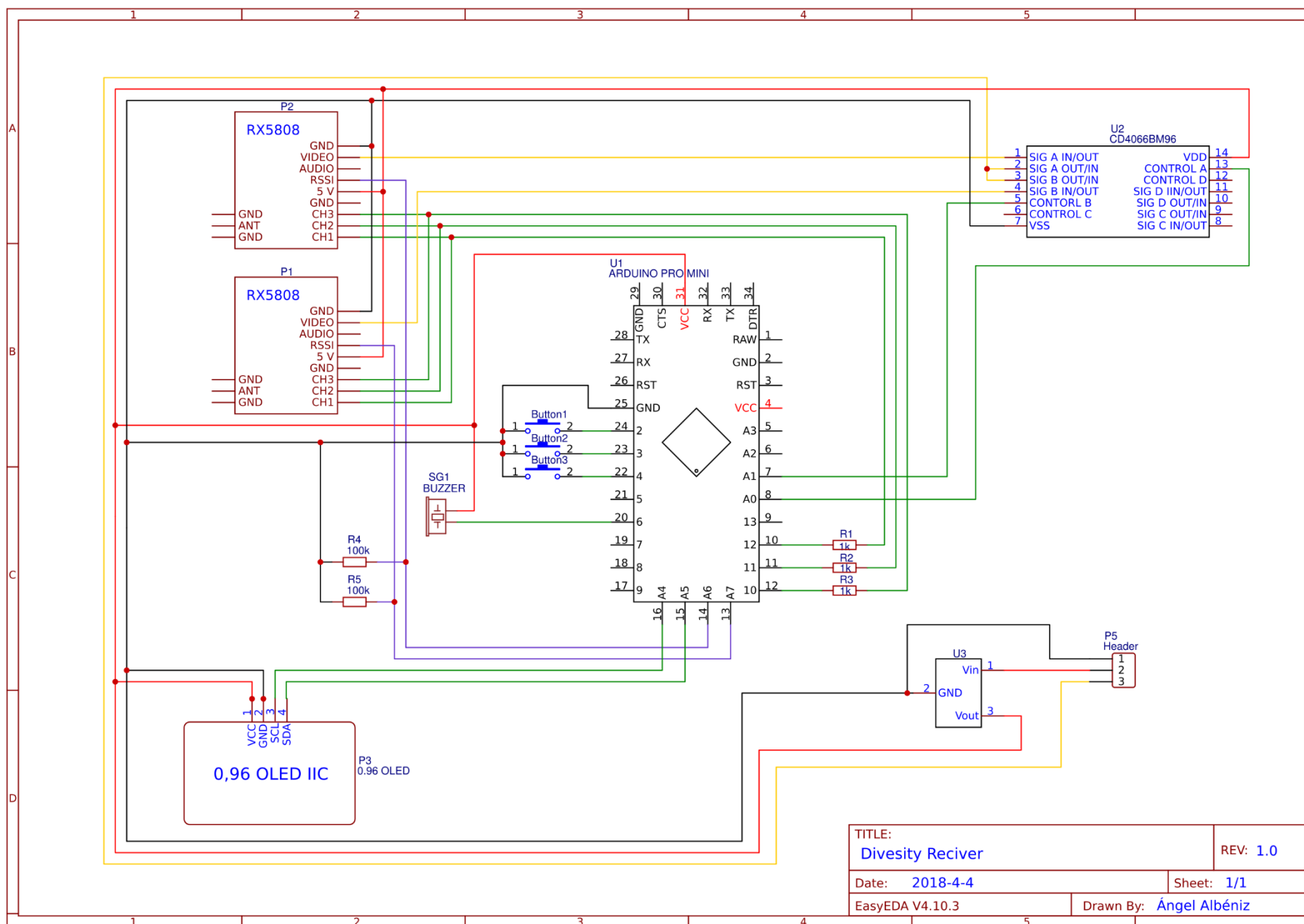
1. Control de usuario por medio de 3 botones de navegación.
2. Buscador automático de canales, selecciona canales en función al valor de RSSI.
3. Buscador manual de canales.
4. Soporte para diversidad de antenas.
5. Soporte para RaceBand, Band A, Band B, Band E, Band IRC, LowBand (48 canales).
6. Escáner de bandas, grafica el valor de RSSI para los 48 canales soportados.
7. Soporte para display OLED.
8. Soporte de buzzer, para alarmas y avisos sonoros.
9. Auto guardado, guarda en memoria configuraciones y canales favoritos.



Figura 55: Logo firmware “rx5808pro”.

3.2.3- Esquemático

A continuación se muestra el diagrama de conexionado de todos los elementos en el receptor de la forma que han sido descritos en apartados anteriores. Este diagrama muestra funcionamiento en conjunto de todos los elementos del receptor.



3.3- Fabricación

Llegado este punto se ha de comenzar la fabricación física del receptor, siguiendo el esquemático de conexonado y las pautas dadas en apartados anteriores.

Para la fabricación de este primer prototipo del receptor se ha optado por soldar todos los componentes y conexiones en una “Perfboard” o “Dot PCB”. Esto presenta varias ventajas a la hora de prototipar, ya que esta técnica resulta muy versátil a la hora de corregir fallos de diseño encontrados en el proceso de fabricación.

Sí que es cierto que esta es solo una solución válida para el prototipado del receptor, para fabricar una versión final del mismo sería conveniente fabricar una PCB a medida sobre la cual soldar los componentes.

A continuación se muestran todos los componentes físicos a montar y la “Perfboard” sobre la que tiene que ir soldados.

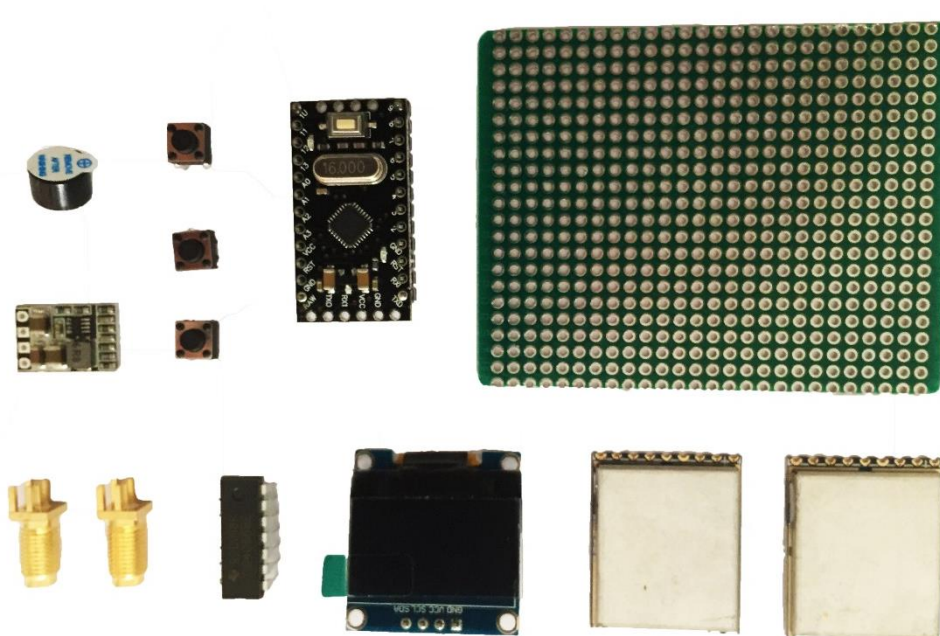


Figura 56: Componentes para el montaje.

Todos estos componentes se tienen que colocar tratando de minimizar el espacio a ocupar y además intentado simplificar al máximo las conexiones entre los mismos. De esta manera se trata de conseguir una placa lo más pequeña posible con al mismo tiempo la mayor simplicidad posible en el conexionado.

Para cumplir con esto se decide colocar tanto componentes como conexiones en ambas caras de la placa, esto dificulta el trabajo de diseño pero conlleva considerables mejoras en cuanto a tamaño y simplicidad de las conexiones en el diseño final.

Tras un largo proceso de diseño y montaje se llega a la siguiente solución:

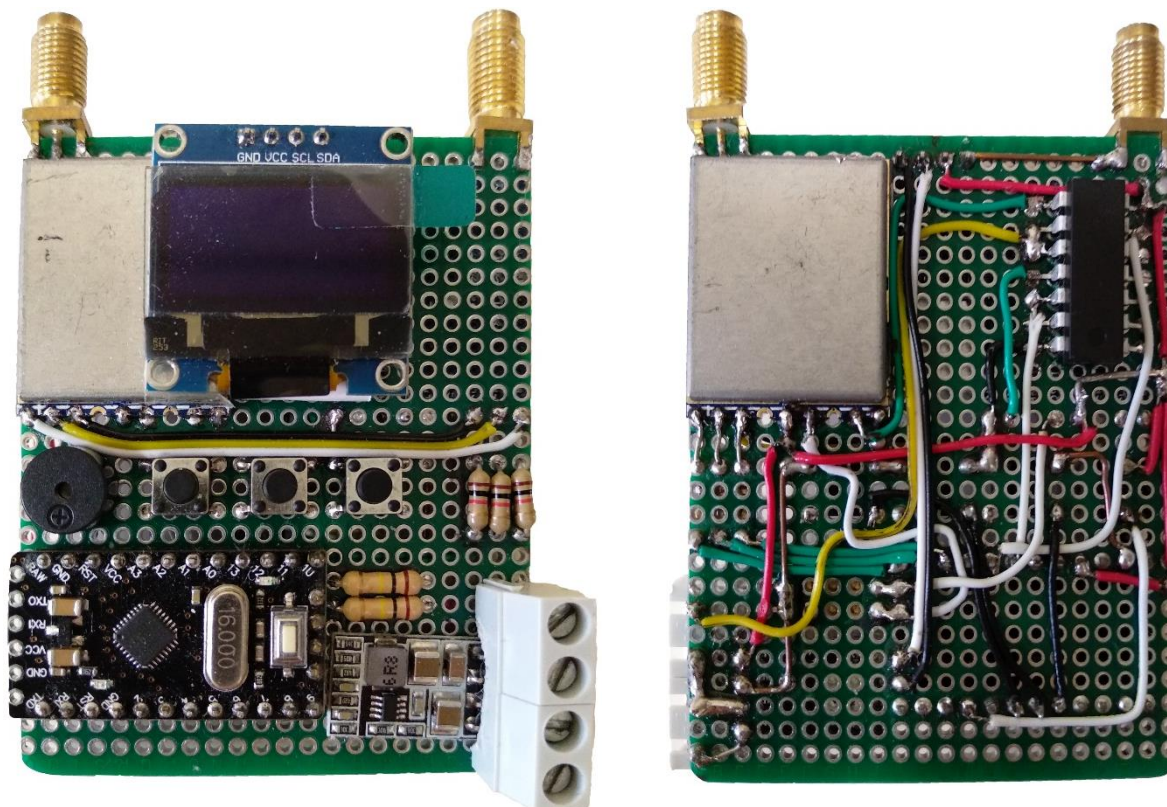


Figura 57: Conexiones física de los componentes en la “Perfboard”.

Tras el montaje se verifica el correcto funcionamiento de todas las conexiones y componentes del receptor corrigiendo los fallos encontrados.

Encapsulado:

Una vez montado y verificado el funcionamiento electrónico del receptor se comienza la fase de diseño de una carcasa rígida donde encapsularlo. Su principal función será la de proteger físicamente los componentes y conexiones del receptor, además de proporcionar una solución para su posterior montaje en una estación base o gafas de FPV (first person view).

Para la fabricación de esta carcasa se usara la técnica de impresión en 3D por adición de material. Ya que actualmente es la formas más sencilla, rápida y económica de realizar este tipo de diseños.

Primero se diseña el modelo 3D de la carcasa en un software de modelado 3D. La carcasa se diseña totalmente a medida para el receptor. Consta de únicamente dos partes, superior e inferior, para simplificar su impresión y posterior instalación.

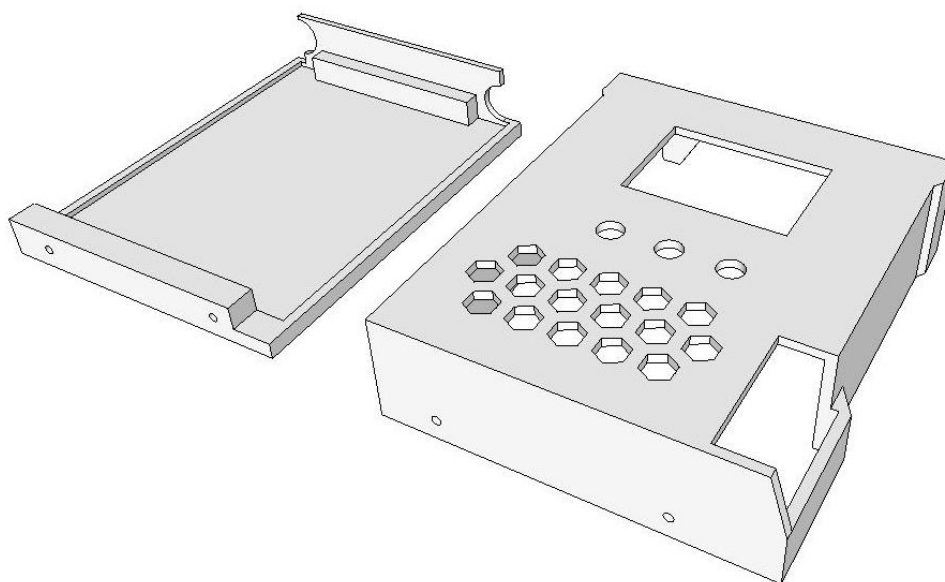


Figura 58: Modelo 3D de la carcasa en SketchUp Pro.

Una vez finalizado el diseño de la carcasa se pasa a la fase de impresión. Para ello se exporta el modelo 3D en formato “stl” a un programa de impresión 3D, en este caso se utiliza CURA de Ultimaker. En este programa se modificaran los parámetros de impresión para ajustarlos a las necesidades requeridas y al tipo material que se va a utilizar. Una vez configurado, el programa realizara el “slicing” del modelo y exportara el archivo Gcode a una tarjeta SD para posteriormente introducirla en la impresora 3D.

La impresora utilizada es una Bq Witbox y el material en el que se va a imprimir es PLA, blanco para la parte superior y negro para la inferior.



Figura 59: Carcasa del receptor fabricada mediante impresión 3D con material PLA.

3.4- Producto final

A continuación se muestra el receptor terminado dentro de la carcasa:



Figura 60: Receptor final.

3.5- Conclusiones y mejoras

Una vez terminado el proceso de diseño, fabricación del receptor se llegan a las siguientes conclusiones sobre el mismo.

Lo primero que se debe decir es que se han cumplido por completo todos los objetivos propuestos para el diseño. El receptor diseñado es totalmente compatible con los transmisores de video analógico utilizados convencionalmente en este tipo de aeronaves. Esto se consigue gracias al módulo receptor escogido, el RX5808, el cual tiene un ancho de banda de frecuencias de RF comprendido entre 5645MHz y 5945MHz, la cual cubre en su totalidad la banda en la que están comprendidos todos los canales de difusión de video analógico de dichos transmisores. Además, gracias a su interfaz SPI se puede variar con facilidad la frecuencia de oscilador del receptor permitiendo escoger como frecuencia central de demodulación cualquiera dentro del rango de RF.

Por otra parte, se ha logrado diseñar un sistema dual de diversidad de antenas totalmente funcional. Esto se consigue gracias a la implementación de dos módulos RX5808, cada uno conectado a una antena diferente y demodulando la señal recogida por la misma. La potencia de señal que llega a cada módulo receptor en cada instante es monitorizada por la placa arduino gracias a las señales de salida analógicas RSSI de los módulos RX5808. Estas señales son muestreadas y comparadas mediante un comparador con histéresis regulable en la placa arduino, la cual decide que señal de video demodulada pasar a la salida del receptor.

Además se ha conseguido implementar funcionalidad extra. Gracias al firmware libre “rx5808-pro”, instalado en la placa arduino, conjunto a la pantalla Oled y la interfaz de usuario por medio de tres botones se consiguen implementar funciones como la selección automática de canal, memoria para guardar canales favoritos y escáner de bandas.

Por ultimo comentar que también se ha conseguido integrar todos los componentes del receptor en una placa de tamaño reducido, la cual además es muy robusta y portable gracias a la carcasa impresa en 3D diseñada para la misma.

Como ya se ha comentado en el apartado 3.3 el receptor está fabricado sobre una “Perfboard” o “Dot PCB” a modo de primer prototipo funcional. La mejora directa sobre esto es la fabricación de una PCB a medida para el mismo. Con esto se consiguen múltiples ventajas.

La primera es que con esta técnica se pueden agrupar de forma más compacta todos los componentes electrónicos que el receptor integra y con esto se consigue reducir aún más el tamaño total del mismo. Con esta técnica también se consigue un resultado mucho más limpio y robusto, ya que elimina las uniones de soldadura y los cables, lo cuales son claramente el punto más débil en cuanto a durabilidad se refiere. Además también se consigue facilitar el proceso de montaje del receptor, eliminando la necesidad de realizar todas las conexiones manualmente.

La única desventaja que presenta esta técnica es la necesidad de llevar a cabo su proceso de diseño y que el coste de fabricación de la misma es elevado en comparación con el coste de una “Perfboard” o “Dot PCB”.

4- Conclusiones

Las ventajas que este sistema completo, compuesto por la nueva antena y el receptor con diversidad, presenta frente a sistemas existentes anteriormente son las siguientes.

El receptor con diversidad dual de antenas permite mejorar considerablemente el rango de vuelo de la aeronave en una dirección concreta, usando una antena direccional para ello, pero sin comprometer el rango de vuelo cercano en el resto de direcciones posibles, ya que para esto se utiliza una antena omnidireccional. El receptor es capaz de discernir entre la señal recibida por cada una de las antenas en cada instante de tiempo. Esto otorga al piloto una mayor versatilidad a la hora de realizar los vuelos.

Además el receptor integra funcionalidad extra que facilita considerablemente su uso, la pantalla oled permite visualizar de forma gráfica diferentes menús para la selección y escaneo automático de los diferentes canales, por otra parte permite guardar en memoria canales favoritos para una selección más rápida de los mismos.

En cuanto a la antena se puede decir que tiene un comportamiento electromagnético excepcional, su parámetro S_{11} es siempre menor que -12 dB en cualquiera de los canales de la banda llegando a mínimos de -23 dB en alguno de ellos. Su diagrama de radiación goza de buena omnidireccionalidad con apenas cambios en azimut. Su discriminación de polarización es muy buena con un valor máximo de relación axial de 5 dB llegando a mínimos de 1.5 dB en determinadas direcciones de radiación.

Pero la mayor ventaja que esta nueva antena presenta frente a los modelos existentes anteriormente es que esta implementa un protector fabricado con TPU, el cual le otorga una excelente resistencia ante los golpes y el desgaste, siendo esto un requerimiento esencial es este tipo de aeronaves. Pero, además este protector está diseñado conjunto a la antena de tal manera que esta funcione correctamente con dicha protección. Esta característica es el principal factor que diferencia a esta antena del resto de antenas existentes para esta aplicación.

5-Lineas futuras

En este apartado se van a discutir posibles mejoras que se podrían realizar al sistema diseñado pero que se escapan del alcance de este proyecto.

En primer lugar se podría realizar un estudio, similar al llevado a cabo con el TPU, en el cual se lleguen a caracterizar las propiedades dieléctricas del FR4. Con estos nuevos valores más exactos de permeabilidad relativa y tangente de pérdidas se podría realizar un mejor diseño de la antena.

Además se podría realizar otro estudio sobre el FR4 en el cual se tenga en cuenta su propiedad anisotrópica, la cual hace que el FR4 no tenga las mismas propiedades dieléctricas en dirección horizontal que en vertical. Si se consigue caracterizar dicha propiedad correctamente se podrá realizar un modelo más preciso en HFSS el cual ayude a mejorar el diseño de la antena.

Otro aspecto en el que se podría profundizar es en la mejora de la discriminación de polarizaciones, ya que en este proyecto el objetivo principal ha sido la mejora de la adaptación de la antena dejando en segundo plano la discriminación de polarización.

Por último se propone el diseño de un modelo de antena totalmente nuevo, con una nueva geometría e incluso con la incorporación de nuevos materiales y tecnologías de fabricación. Con esto se intentaría mejorar el funcionamiento global de la antena, tanto sus características dieléctricas como físicas.

6- Bibliografía

- [1] “Antena pagoda: [En línea] <http://www.maartenbaert.be/quadcopters/antennas/pagoda-antenna/>”.
- [2] “Poliuretano termoplástico: [En línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Poliuretano_termoplástico”.
- [3] “Datasheet RTC5715: [En línea] https://github.com/markohoeppen/rx5808_pro_osd/blob/master/datasheet/RTC6715.pdf”.
- [4] “Datasheet cd4066B: [En línea] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4066b.pdf>”.
- [5] “rx5808pro firmware wiki: [En línea] <https://github.com/sheavey/rx5808-pro-diversity>”.

Enlaces y referencias de las imágenes usadas:

- Figura 1: <https://static.rcgroups.net/forums/attachments/4/2/7/8/3/5/a9250187-172-1eiJgsa.jpg>
- Figura 41: <https://img.staticbg.com/thumb/view/upload/2012/chenjianwei/SKU075321.3.jpg>
- Figura 42: https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/812piKCb4RL._SY463_.jpg
- Figura 43, 44: https://github.com/markohoeppen/rx5808_pro_osd/blob/master/datasheet/RTC6715.pdf.
- Figura 45: http://3dmodularsystems.com/2065-large_default/ecran-oled-096-128x64-i2c-iic-module-pour-arduino-bleu.jpg
- Figura 46: https://hobbyking.com/media/catalog/product/cache/4/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/legacy/catalog/99132_1__3.jpg.
- Figura 50: <https://raw.githubusercontent.com/sheavey/rx5808-pro-diversity/develop/media/logo.png>